

Materialien zur Altlastenbehandlung

Nr.6/98

Oberflächensicherung von Altablagerungen und Deponien

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Vorwort

Von Altablagerungen und Deponien dürfen keine Umweltbeeinträchtigungen ausgehen. Die Oberflächensicherung ist hierbei eine entscheidende Voraussetzung, um dieses Ziel dauerhaft zu erreichen.

Durch eine Abdichtung bzw. Abdeckung soll die Ausbreitung der Schadstoffe verhindert und der direkte Kontakt zum Menschen sowie zu Flora und Fauna unterbunden werden. Dabei sind verschiedene rechtliche Rahmenbedingungen und technische Konzepte zur Realisierung der Oberflächensicherungen zu beachten.

Neben den in der TA Siedlungsabfall definierten Systemen wurden in den letzten Jahren alternative Methoden entwickelt sowie deren Eignung untersucht und nachgewiesen. Ein Schwerpunkt dieser Arbeiten war die Simulation der Auswirkungen der Oberflächensicherungen auf den Wasserhaushalt der Deponien und Altablagerungen, um Rückschlüsse für die Optimierung der unterschiedlichen Varianten ziehen zu können.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und die sich daraus ergebenden Konsequenzen zur Auswahl der ökologisch und ökonomisch geeigneten Sicherungsvariante wurden in letzter Zeit in der Fachwelt kontrovers diskutiert.

Die vorliegende Veröffentlichung soll die Wahl eines geeigneten Sanierungsverfahrens für Altablagerungen und Deponien zu unterstützen.

Die einzelnen Systeme zur Oberflächensicherung werden vorgestellt und anhand wichtiger Kriterien wie Dichtigkeit, Beständigkeit und Standortanforderungen bewertet. Darüber hinaus gibt die Veröffentlichung Empfehlungen zur Rekultivierung hinsichtlich der Auswahl des Bodensubstrates und der Vegetation.

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kinze

Präsident des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie

1. Einleitung, Veranlassung, Ziel

Ziel des Materialienbandes "Oberflächensicherung von Altablagerungen und Deponien" ist es, den aktuellen Stand des Wissens auf dem Gebiet aufzuzeigen und entsprechende Handlungsempfehlungen zu geben. Unter dem Begriff "Oberflächensicherung" werden technische Maßnahmen an der Oberfläche einer Altablagerung oder Deponie verstanden, mit denen die Ausbreitung von Schadstoffen und deren Einwirkung auf Schutzgüter verhindert oder verringert wird. Insbesondere soll eine Sickerwasserminimierung erreicht werden. Die Oberflächensicherung erfolgt durch eine Oberflächenabdichtung bzw. -abdeckung. Hierbei wird in Anlehnung an den Entwurf der Arbeitshilfe "Oberflächensicherung" des ITVA folgende begriffliche Trennung eingeführt:

- Oberflächenabdichtungssystem
 - mehrschichtiges System, bestehend aus einer Ausgleichs-, Dichtungs-, Entwässerungs- und Rekultivierungsschicht, bei dem die verschiedenen und voneinander eindeutig getrennten Schichten jeweils spezifische Funktionen übernehmen
 - Material mit definierten Kennwerten
 - Umsetzung der planerischen Leistung durch Qualitätssicherung beim Herstellungs- und Einbauprozess nachgewiesen
 - hohe Dichtigkeit der Dichtungsschicht
 - langfristige Wirksamkeit durch Aufbau des Systems sichergestellt
- Oberflächenabdeckung
 - Bodenauftrag ohne vollständige Dichtungsfunktion.

Schwerpunkt des vorliegenden Materialienbandes ist eine vergleichende Betrachtung von Systemen zur Oberflächenabdichtung bzw. -abdeckung. Ausgehend von den Regelabdichtungen nach TA Siedlungsabfall werden alternative Abdichtungen angesprochen und anhand der Kriterien Dichtigkeit, Standortanforderungen, Beständigkeit, Systemsicherheit und Herstellbarkeit bewertet. Es werden Beispiele für Gesamtkosten aufgeführt, Aussagen zur Gleichwertigkeit getroffen sowie einige Referenzprojekte benannt.

Des weiteren werden sogenannte "qualifizierte Abdeckungen" besprochen, worunter der auf die jeweiligen Standortverhältnisse angepasste Aufbau von Abdeck- und Rekultivierungsschicht mit Vegetationsdecke verstanden wird. Hierzu werden unter dem Gesichtspunkt der Versickerungsminimierung notwendige Anforderungen an Bodensubstrat und Vegetation dargestellt. Für die nachhaltige Beeinflussung des Wasserhaushaltes auf Altablagerungen bzw. Deponien ist ein grundlegendes Verständnis der den Wasserhaushalt wesentlich beeinflussenden Elemente notwendig. Neben einer Erläuterung der Einflußgrößen bzw. der Bodenwasserhaushaltsbeziehungen wird ein Ausblick auf mögliche Simulationsmodelle gegeben.

Der Titel des Materialienbandes verdeutlicht, dass hinsichtlich der Anforderungen an die Oberflächensicherung für Altablagerungen / Deponien verschiedene rechtliche Grundlagen berührt werden.

Für Altablagerungen ergeben sich die Notwendigkeiten und Umfänge durchzuführender Sicherungsmaßnahmen aus dem am 01. März 1999 in Kraft getretenen Bundes-

Bodenschutzgesetzes (BBodSchG). Insbesondere ist gemäß § 4 Abs. 3 BBodSchG der Nachweis zu erbringen, dass eine Ausbreitung der Schadstoffe durch eine wirksame Oberflächensicherung langfristig verhindert wird. Grundsätzlich gilt der Grundsatz der Gefahrenabwehr, d. h., dass die Technischen Anleitungen (TA Siedlungsabfall, TA Abfall) für die Oberflächensicherung von Altablagerungen herangezogen werden können, jedoch für diesen Bereich nicht bindend sind. Die Deponien mussten bis zum 30.06.1990 stillgelegt sein, um als Altablagerungen klassifiziert zu werden.

Bei Deponien, die nach dem 30.06.1990 noch betrieben wurden, richten sich die Anforderungen an die Oberflächensicherung nach §§ 35 bzw. 36 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. Im Freistaat Sachsen wurde der Ablauf und die Organisation der Stilllegung von Deponien im Erlaß des SÄCHSISCHEN STAATSMINISTERIUMS FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG vom 09.05.1997 (Az.: 33-8976) geregelt. Die erforderlichen Rekultivierungs- und Schutzmaßnahmen haben sich an den Schutzziele der TA Siedlungsabfall / TA Abfall zu orientieren und sind einzelfallkonkret nach pflichtgemäßem Ermessen unter Abwägungen der regionalen, technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen festzulegen. Maßstab für die Qualität der durchzuführenden Oberflächensicherung ist die vorhandene Gefährdung. Die Untersetzung der vom Gefährdungsgrad abhängigen technischen Maßnahmen wird in der "Richtlinie zur Sicherung und Rekultivierung von Altdeponien im Freistaat Sachsen" geregelt, welche vom Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft erarbeitet wurde.

2. Darstellung und Bewertung der Oberflächensicherungssysteme

2.1. Einleitung

Im vorliegenden Materialienband wird die Bezeichnung "Ablagerung" als Oberbegriff sowohl für Altablagerungen als auch für Deponien verwendet. Erfordern die nachfolgenden Ausführungen eine begriffliche Unterscheidung, wird jeweils getrennt von Altablagerungen bzw. Deponien gesprochen.

Primäre Aufgabe der Oberflächensicherung ist die Sickerwasserminimierung. Sie hat somit vorwiegend abdichtende Funktionen zu erfüllen. In den überwiegenden Fällen soll die Oberflächensicherung gut rekultivierbar sein und entstehendes Deponiegas zurückhalten. Diesen und anderen Aufgaben soll die Oberflächensicherung als entscheidende Komponente des Multibarrierenkonzeptes langfristig, mindestens jedoch über mehrere Jahrzehnte im Wege einer nachsorgearmen Ablagerung gerecht werden. Dabei sind die im Laufe eines über Jahrzehnte / Jahrhunderte dauernden Bestehens der Ablagerung verschiedenen Einflußfaktoren wie Austrocknung, Durchnässung, Frost, Setzung und Durchwurzelung zu beachten.

Alternative Abdichtungssysteme können den Regelsystemen durchaus gleichwertig sein. Im folgenden sollen die Regelabdichtungen nach TA Siedlungsabfall sowie alternative Abdichtungen beschrieben und hinsichtlich der Kriterien **Dichtigkeit, Standortanforderungen, Beständigkeit, Systemsicherheit und Herstellbarkeit** bewertet werden. Neben der Beurteilung der Eigenschaften

der Dichtungen werden Kosten aufgeführt. Auf der Grundlage der genannten Kriterien ist ein Vergleich verschiedener Abdichtungssysteme und eine Vorauswahl möglich. Die Beurteilungskriterien können jedoch nicht die Einzelfallentscheidung vor Ort ersetzen.

2.2. Regelabdichtungen nach TA Siedlungsabfall

2.2.1. Kombinationsabdichtung für Deponieklasse II

Nach Nr. 10.4.1.4 Buchst. b TA Siedlungsabfall soll für Deponien der Klasse II (Siedlungsabfälle) die Kombinationsabdichtung entsprechend Abb. 1 oder mit einem gleichwertigen System ausgeführt sein.

Die mineralische Dichtungsschicht wird 2-lagig aufgebracht und darf insgesamt 0,5 m nicht unterschreiten. Für den Durchlässigkeitsbeiwert wird $k_f \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s bei $i = 30$ (Laborwert) gefordert. Die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) aus PEHD muss eine Mindeststärke von $d \geq 2,5$ mm aufweisen und wird zur Vermeidung von Faltenwurf im Preßverbund auf die bindige mineralische Dichtung verlegt. Zur Gewährleistung der UV-Beständigkeit bei Zwischenlagerung der KDB im Freien bzw. einem vorübergehenden Freiliegen der Dichtung beim Verlegen wird die KDB mit ca. 2%-Rußpigmentierung versetzt.

Dichtigkeit

Die Kombinationsabdichtung ist aufgrund der dicht verschweißten Kunststoffdichtungsbahn gas- und wasserdicht.

Standortanforderungen

Kunststoffdichtungsbahnen können eine potentielle Gleitfläche darstellen; die Standsicherheit ist deshalb besonders zu beachten. Bei Neigungen steiler als 1:4 sollte in jedem Fall ein rechnerischer Standsicherheitsnachweis geführt werden. Neigungen bis 1:3 sind i. d. R. beherrschbar, ab Neigungen größer 1:3 können zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der Standsicherheit, z. B. Rückverankerung durch zugfeste Gitter, notwendig werden (BURKHARDT & EGLOFFSTEIN, 1994). Bei Aufgrabungen von Kombinationsabdichtungen wurde von VIELHABER (1997) auf der Oberfläche der bindigen mineralischen Komponente Kondenswasser festgestellt. Das freie Wasser in der Fuge zwischen KDB und bindiger mineralischer Dichtung kann bei unzureichender Profilierung der PEHD-Bahn an steilen Hängen die Standsicherheit des Systems gefährden. Dieser temperaturinduzierte Wassertransport hat jedoch ein sehr geringes Ausmaß (VIELHABER, 1997). Danach werden weniger als ein Millimeter Wasser pro Jahr in der bindigen mineralischen Dichtung im Sommer abwärts und im Winter aufwärts transportiert.

Gegenüber Setzungen ist die Kombinationsabdichtung so empfindlich wie die Einzelkomponenten (siehe Kapitel 2.2.2 bzw. 2.4.1).

Die Regelabdichtung ist bei wenig tragfähigem Untergrund schwierig herzustellen (z. B. Klärschlammdeponie), so dass i. d. R. der Einbau einer ausreichenden Ausgleichsschicht erforderlich ist. Am Deponierand besteht beim Aufbringen der Dichtung hoher Platzbedarf.

Eine Nachfolgenutzung ist nur bei geringen Flächenlasten und Auflastunterschieden möglich. Bei baulicher Nutzung können Probleme bei der Durchdringung von Ver- und Entsorgungsleitungen entstehen, so dass eine Bebauung unterbleiben sollte.

Beständigkeit

Die KDB wirkt als Wurzel- und Konvektionssperre. Die Kombinationsabdichtung ist daher bei intakter KDB gegen Austrocknung und Durchwurzelung unempfindlich.

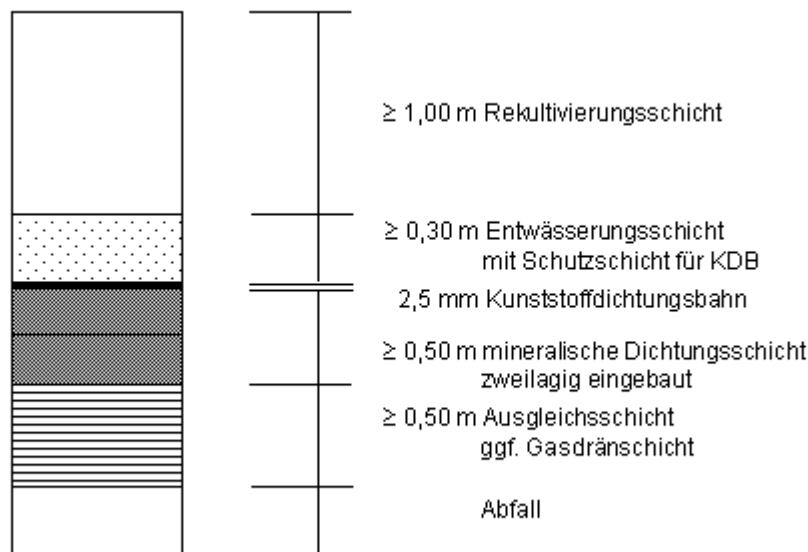


Abb. 1: Oberflächenabdichtungssystem für Deponieklasse II

Probleme können sich jedoch bei einer Austrocknung der mineralischen Dichtung von unten durch höhere Temperaturen im Abfallkörper ergeben. Dieser schon unter dem Punkt Standortanforderungen angesprochene temperaturinduzierte Wassertransport hat nach VIELHABER (1997) ein sehr geringes Ausmaß. Die potentielle Gefährdung der Kombinationsabdichtung ist auf lange Sicht gesehen, von zwei Faktoren abhängig:

- Klimatische Situation: Je höher die Bodentemperaturen steigen und je länger dieser Prozess dauert, desto mehr Wasser wird aus der bindigen mineralischen Schicht ausgetragen.
- Temperatur im Deponieinneren:
 - Über einem abgekühlten Deponiekörper überwiegt im Jahresverlauf der Wasseraustrag aus der bindigen Komponente. Die Wasserabgabe ist sehr gering, so dass sie erst nach Jahrzehnten zu einer Rissbildung führen kann.
 - Über wärmeproduzierenden Ablagerungen stellt die temperaturabhängige Wärmebewegung zunächst keine Gefährdung der mineralischen Komponente dar, da die im Jahresmittel überwiegend aufwärts gerichtete Wasserbewegung (aus dem Abfallkörper) die sommerliche Wasserabgabe kompensiert.

Die Beständigkeit der Kunststoffdichtungsbahn mit BAM-Zulassung (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) wird mit über 100 Jahren angegeben (MÜLLER & AUGUST, 1997). Die

Langzeitbeständigkeit der KDB nimmt mit steigenden Temperaturen ab. Dies ist jedoch bei Oberflächenabdichtungen weniger problematisch. Der Durchfluss durch Perforationen der KDB wird durch den Pressverbund mit der mineralischen Dichtung an der horizontalen Ausbreitung gehindert.

Systemsicherheit

Die Kombinationsabdichtung entspricht dem Stand der Technik. Die Kontrollierbarkeit einer Systemkomponente, der KDB, ist durch den parallelen Einbau eines Leckdetektionssystems möglich (siehe Kapitel 2.4.2). Diese Oberflächenabdichtungen sind prinzipiell reparierbar.

Die Komponente mineralische Dichtung soll in der Kombinationsabdichtung zum einen die Fehler der KDB ausgleichen, zum anderen soll sie über die Funktionsdauer der KDB hinaus die Langzeitfunktion der Abdichtung gewährleisten. Anhand verschiedener Untersuchungen u. a. auf der Deponie Hamburg-Georgswerder (MELCHIOR 1993; MELCHIOR et al. 1993; MELCHIOR, VIELHABER & MIEHLICH, 1994; MELCHIOR et al. 1994) wurde belegt, dass zumindest bindige mineralische Materialien (ohne KDB) austrocknen können.

Die Materialeigenschaften der einzubauenden Böden werden bislang weniger nach bodenphysikalischen sondern mehr nach bodenmechanischen Gesetzmäßigkeiten beschrieben. Neben der Klassifikation der Bodenarten und den bodenmechanischen Eigenschaften Festigkeit / Verformbarkeit trifft das auch für die Wasserdurchlässigkeit zu. Dieser Parameter wird nach DIN 18130 für den Zustand der Wassersättigung ermittelt. Der Einbau der mineralischen Dichtung erfolgt zwar i. d. R. mit hohem Wassergehalt, um eine geringe Durchlässigkeit für Deponiegas und Wasser im eingebauten Zustand zu erreichen. Im eingebauten Zustand stellt sich jedoch eine Feuchtigkeitsverteilung ein, die in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad, der Feuchtigkeitszufuhr aus dem Deponiekörper, dem Temperaturgradienten und den Stoffeigenschaften der Schicht jahreszeitlichen und langfristigen zeitlichen Schwankungen unterworfen ist.

Mineralische Dichtungen im Bereich der Oberflächenabdichtung liegen immer im ungesättigten Zustand vor. Unterschreitet der Wassergehalt in der mineralischen Dichtung einen bestimmten Wert, so kommt es zur Bildung von Trockenrissen, die durch Pflanzenwurzeln verstärkt werden können, wenn Perforationen der KDB vorliegen. Wasserzufuhr kann in gewissem Umfang die Schäden durch Rissbildung verringern; eine vollständige Selbstheilung gibt es jedoch nicht. Durch sukzessives Fortschreiten der Prozesse kann die mineralische Dichtung ihre Funktionsfähigkeit verlieren. Die Gefahr der Schrumpfung und Rissbildung trifft vor allem für die "einfache" bindige mineralische Dichtung (ohne darüberliegende KDB) zu.

Neben dem verstärkten Einbau nicht schrumpffähiger Materialien orientiert die BAM auf einen Einsatz der Kombinationen KDB-Bentonitmatte, KDB-Leckdetektionssystem bzw. KDB-Kapillarsperre (MÜLLER & AUGUST, 1997).

Herstellbarkeit

Die KDB muss über eine Zulassung gemäß BAM-Richtlinie verfügen (BAM, 1992). Die Darstellung der wichtigsten Anforderungen dieser Richtlinie sowie die in 1997 vorgenommenen Änderungen werden im Kapitel 2.4.1 beschrieben. Hier sollen nur die für das System Kombinationsabdichtung relevanten Dinge besprochen werden.

Der Einbau der KDB muss so erfolgen, dass das Kunststoffdichtungselement auf einer einwandfreien Oberfläche der mineralischen Dichtung plan aufliegt. Nur dann können spätere Auflasten durch Schutz-, Drän- und Rekultivierungsschicht zu einem vollflächigen inneren Verbund (Pressverbund) zwischen KDB und mineralischer Dichtung führen. Dabei ist ein genau abgestimmter Bauverfahrensablauf einzuhalten. Die Kunststoffdichtungsbahnen sollen verlegtägig unter planmäßiger Ausnutzung ihres thermischen Ausdehnungsverhaltens und des Tag-Nacht-Temperaturverlaufes ballastiert werden. Durch frühzeitiges Ballastieren der glattgezogenen Bahn können Einbaufehler wie zu starke Welligkeit, Überspannung von Kehlen oder Schädigung der mineralischen Dichtung unter der Bahn durch Vernässung vermieden werden.

Das Dichtungsaufleger und die mineralische Dichtungsschicht müssen so stabil sein, dass die KDB durch lokale Setzungen mit nicht mehr als 3% mehraxialer Dehnung beaufschlagt wird. Die Oberfläche der mineralischen Dichtung muss so beschaffen sein, dass durch den Pressverbund keine mechanische Schädigung der KDB entsteht. Unmittelbar vor der Verlegung der KDB ist die Oberfläche der mineralischen Dichtung von der örtlichen Bauleitung, der Verlegefirma und dem Fremdüberwacher freizugeben. Die Herstellung des Deponieabdichtungssystems muss in ein Qualitätssicherungssystem auf der Grundlage der DIN ISO 9000 bis DIN ISO 9004 eingebunden sein.

Der Einbau der tonmineralischen Schichten bzw. das Fügen der Kunststoffdichtungsbahnen ist stark von der Witterung abhängig. Während der Verschweißarbeiten sind in Abhängigkeit spezifischer Materialeigenschaften der KDB, entsprechend der BAM-Richtlinie und in Anlehnung an die DVS 2225 Teil1 Umgebungsbedingungen und Schweißparameter aufeinander abzustimmen. Bei Niederschlägen und Temperaturen unter 5°C sind entsprechende Schutzvorkehrungen (z. B. Zelt) zu treffen. Bei hoher Welligkeit in Folge starker Sonneneinstrahlung darf nicht verschweißt werden. Ebenso ist die Witterungsempfindlichkeit der mineralischen Komponente sehr hoch (Veränderungen des Wasserhaushaltes, starke Sonneneinstrahlung). Der Bildung von Schrumpfrissen durch Austrocknen der mineralischen Dichtung ist durch Befeuchten und / oder Abdecken entgegenzuwirken.

Das Material für die mineralische Dichtung soll nach Möglichkeit aus der näheren Umgebung der Ablagerung gewonnen werden, s. hierzu Kapitel 2.2.2, Punkt Herstellbarkeit.

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für die *Kombinationsabdichtung*:

Dichtigkeit	
Gas	- dicht dichtendes Element: KDB
Wasser	- dicht dichtendes Element: KDB
Standortanforderungen	
Standicherheit	- begrenzt durch Scherfestigkeit der Kontaktfläche KDB - mineralische Dichtung bzw. KDB – Schutzschicht - ab Neigung 1:4 sind Standsicherheitsnachweise zu führen - ab Neigung 1:3 sind zusätzliche Maßnahmen notwendig (z. B. Rückverankerung durch zugfeste Geogitter)
Setzungsempfindlichkeit	- hoch durch geringe Verformungsaufnahme der mineralischen* Dichtung - besonders empfindlich gegenüber Setzungssprüngen, - Setzungsmulden mit Verhältnis Tiefe : Durchmesser von > 1:7 stellen Belastungsgrenze dar
Platzbedarf	- hoch, besonders am Rand der Deponie
Nachfolgenutzung	- eingeschränkt - nur bei geringen Flächenlasten und Auflastunterschieden, bei baulichen Nutzungen müssen Setzungen abgeklungen sein, Schutz vor Durchdringung der Dichtung durch Versorgungsstraßen ist zu gewährleisten
Beständigkeit	
Austrocknung	- keine Austrocknung (solange KDB intakt)
Durchwurzelung	- keine Durchwurzelung (solange KDB intakt)
mechanische Einwirkungen	- leichte Verletzbarkeit durch scharfkantige Körner, Einbau eines Schutzvlieses empfohlen
Langzeitverhalten / Alterung	- BAM-zugelassene KDB: ca. 100 Jahre beständig - mineralische Dichtung: in Abhängigkeit vom Wassergehalt Bildung von Rissen möglich
Witterung	- Nach Einbau relativ witterungsunabhängig durch Überdeckung mit weiteren Schichten und Konvektionswirkung der KDB

	- KDB: durch Rußpigmentierung UV-stabil - mineralische Komponente: Auftreten von temperaturinduzierten Wassertransporten
Systemsicherheit	
Redundanz	- durch Kombination zweier Dichtungssysteme gegeben (unter Einschränkung der Austrocknungsgefahr für bindiges mineralisches Material)
Kontrollierbarkeit	- nur durch zusätzliche Kontrolleinrichtungen
Reparierbarkeit	- nach Freilegung grundsätzlich möglich
Schwachstellen	- KDB: Schweißnähte, Durchdringungen - mineralische Dichtung: bei Verwendung von bindigem Material besteht Austrocknungsgefahr, Tendenz zum Einsatz von gestuftkörnigem oder weniger schrumpffähigem Material (hierzu derzeit kaum Auswertungen vorliegend) bzw. Ersatz durch andere Dichtungselemente
Herstellbarkeit	
Bautechnische Ausführung	- KDB: Verlegung gemäß BAM-Richtlinie - (Überlappnähte mit Prüfkanal – Doppelnähte – im Heizkanalverfahren, Personal: Schweißfachausbildung nach DVS- Richtlinie 2213) - mineralische Dichtung: Einbau in 2 Lagen (25 cm bei plastischer Konsistenz) - Verwendung von Schutzschichten mit BAM-Zulassung
Anforderungen an die Zulassung von Baustoffen	- KDB: BAM-Zulassung - mineralische Dichtung: verwendetes Material muss zum Erreichen des vorgegebenen k_f-Wertes gut verdichtbar sein
Witterungsabhängigkeit (Einbau)	- Stark witterungsabhängig - KDB: Einbau bei Temperaturen $< 5\text{ °C}$ sowie bei Niederschlägen, sehr starker Sonneneinstrahlung und auf Flächen mit anstehendem Wasser nicht möglich - mineralische Dichtung: Einbau bei Temperaturen $< -2\text{ °C}$ bzw. stärkeren Niederschlägen nicht möglich, bei starker Sonneneinstrahlung Abdecken bzw. Befeuchten der mineralischen Dichtung notwendig
Qualitätssicherung	- Aufstellen des Qualitätssicherungsplanes nach Nummer 10.4.1.2 TASi mit Eigen- und Fremdprüfung sowie

	Überwachung durch die zuständige Behörde, Durchführung der Qualitätsprüfung nach Nr. 3.2 des Anhangs E TA Abfall, Berücksichtigung der DVS-Richtlinie 2225 im Rahmen der Eigenüberwachung bei der Verlegung der KDB
Materialverfügbarkeit	- KDB: verschiedene Anbieter - Mineralische Dichtung: hoher Aufwand zur Beschaffung des Materials, wenn nicht ortsnahe verfügbar
Gleichwertigkeit	- Regelsystem, Gleichwertigkeitsnachweis nicht notwendig
Kosten	- Gesamtkosten (mit Einbau): 130-150 DM/m² - Einzelkosten: s. Kostenübersicht im Anhang 1
Referenzprojekte	- Deponie Gröbern, LKr Meißen - Deponie "Lumpicht", Aue, LKr Aue-Schwarzenberg - Klärschlammdeponie Fa. Akzo Nobel, Oderbruch (Realisierung einer Böschungsneigung von 1:2 bei Ersatz der Dränageschicht durch Dränmatte, STEFFEN et al. 1997) - Deponie "Hintere Dollert", Landkreis Rastatt (schwierige Geometrie mit Böschungsneigung bis zu 1:2,6, umfangreicher Standsicherheitsnachweis, Reibungswinkel für die Scherfuge mineralische Dichtung / KDB $\geq 26,6^\circ$)

2.2.2. Mineralische Dichtung für Deponieklasse I

Die Oberflächenabdichtung nach Nr. 10.4.1.4. Buchst. b TASI für Deponien der Klasse I soll als mineralische Dichtung gemäß Abb. 2 oder mit einer gleichwertigen Dichtung ausgeführt werden.

Die mineralische Dichtungsschicht ist 2-lagig mit einer Mindeststärke von insgesamt 0,5 m zu verlegen. Ebenso ist der bei der Kombinationsabdichtung geforderte Durchlässigkeitsbeiwert $k_f \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s bei $i = 30$ (Laborwert) einzuhalten.

Dichtigkeit

Mineralische Dichtungen sind nicht vollständig wasser- und gasdicht. Die Wasserdichtigkeit ist abhängig vom k_f -Wert, der Überstauhöhe, bodenphysikalischen und klimatischen Verhältnissen sowie der Mächtigkeit der Dichtungs- und Rekultivierungsschicht. Die Gasdichtigkeit wird wesentlich vom Verdichtungsgrad beim Einbau (Proctordichte) und vom k_f -Wert bestimmt.

Standortanforderungen

Die mineralische Dichtung ist setzungsempfindlich gegenüber Setzungssprüngen. Gemäß GDA-Empfehlung E2-16 (1993; 1995 für verbindlich erklärt) sind Verformungsnachweise notwendig. Der Vorteil der mineralischen Dichtung besteht in der hohen Standsicherheit bis zu einer Böschungsneigung von 1:2,5. Bei verschiedenen Objekten, wurden teilweise noch steilere Böschungsneigung (z. B. Deponie Karlsruhe-West, max. 1:2,1, SCHWARZMÜLLER & ROTH, 1997) realisiert. Am Deponierand besteht hoher Platzbedarf. Aufgrund der Probleme bei der Durchdringung von Ver- und Entsorgungsleitungen sollte eine bauliche Nachnutzung unterbleiben.

Beständigkeit / Systemsicherheit

Mineralische Dichtungen werden bereits lange im Deponiebau eingesetzt und haben sich für die Deponiebasis bewährt. Im Bereich der Oberflächenabdichtung liegen jedoch völlig veränderte Bedingungen und Anforderungen vor, die bei der Definition der Regelabdichtung für Oberflächenabdichtungssysteme zu wenig berücksichtigt wurden. Verdichtungsgrad und Wassergehalt der mineralischen Dichtung werden zwar in den Technischen Anleitungen reglementiert, der Einsatz spezieller Einbautechnologien jedoch weitgehend offen gelassen. Zu Quellvermögen bzw. Plastizität der bindigen Schicht werden keine Aussagen getroffen.

Rein bautechnisch lassen sich die in der TA Siedlungsabfall geforderten geringen Durchlässigkeiten mit bindigen mineralischen Dichtungen erreichen. Die Eigenschaften mineralischer Dichtungen hängen jedoch sehr stark vom Wassergehalt ab. Dieser lässt sich bei der Bauausführung und entsprechender Qualitätssicherung relativ exakt einstellen, aber nicht ohne weiteres über längere Zeit konservieren. Anders als in der Basisabdichtung unterliegt der Wassergehalt in der bindigen mineralischen Schicht jahreszeitlichen und langfristigen zeitlichen Schwankungen, die für die z.T. beobachteten Prozesse der Austrocknung und Durchwurzelung der mineralischen Schicht verantwortlich sind.

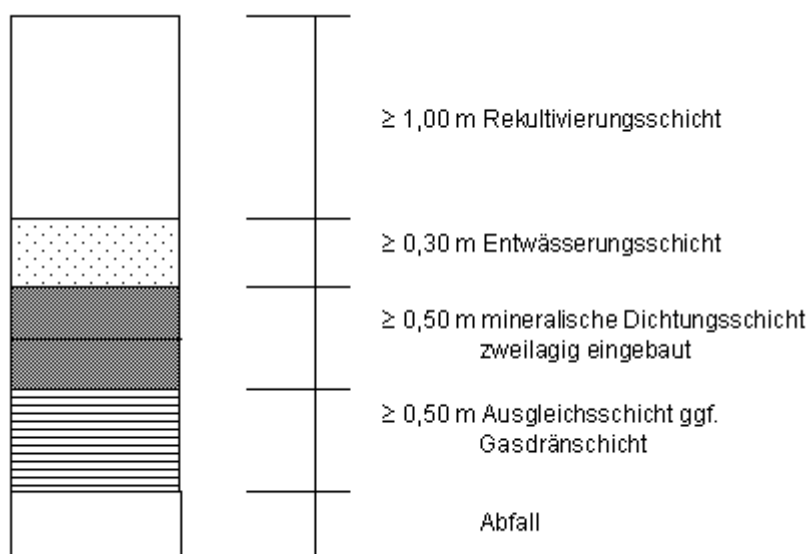


Abb. 2: Oberflächenabdichtungssystem für Deponieklasse I

Zur Erläuterung dieser Phänomene sollen nachfolgend einige bodenphysikalische Gesetzmäßigkeiten dargestellt werden. Die Rekultivierungs- bzw. Entwässerungsschicht sind äußerst selten oder nie dauerhaft wassergesättigt. In der Entwässerungsschicht treten ausgeprägte Trockenphasen auf, die für die Wasserbewegung erhebliche Bedeutung haben. Im wasserungesättigten Boden herrschen Kapillardrücke, die um so höher sind, je trockener der Boden ist. Die Kapillardrücke werden auch als Wasser- bzw. Saugspannung bezeichnet werden. Die Wasserspannung ist ein Maß für die Fähigkeit des Bodens, Wasser an der Bodenmatrix zu halten (s. Kapitel 3.2.2.2).

Wassergehalt und Wasserspannung des mineralischen Materials sind vom Porensystem (in dem sich das Wasser befindet) abhängig. Die bindige mineralische Dichtung weist aufgrund ihrer Verdichtung kaum Poren auf. Bei steigender Wasserspannung nimmt der Wassergehalt daher nur sehr langsam ab. Erst bei sehr hohen Wasserspannungen von mehreren hPa entwässern nennenswerte Porenanteile. Somit führt bereits die Abgabe geringer Wasservolumina zu sehr hohen Wasserspannungen. Diese Wasserspannungen wirken als Zugspannungen an den einzelnen Bodenkörnern. An Schwachpunkten mit relativ geringer Kohäsion zwischen den Bodenpartikeln oder in Bereichen an denen Partikel so verkeilt sind, dass sie den Zugkräften nicht mehr folgen können, reißt der Boden. Bei weiter steigender Wasserspannung werden sich die Risse immer stärker vernetzen. Dieser Prozeß kann durch Pflanzenwurzeln verstärkt werden. Die maximalen Rissbreiten sind zwar begrenzt, da aufgrund der Verdichtung wenig Volumen für die Gesamtschrumpfung vorhanden ist, eine vollständige Selbstheilung bei Wasserzufuhr, wie in KOCH (1994) dargestellt, gibt es jedoch nicht.

Durch sukzessives Fortschreiten der Prozesse (Bildung von Trockenrissen, Verstärkung durch Pflanzenwurzeln) wird die Funktionsfähigkeit der mineralischen Dichtung verringert. Ob und wie schnell dieses Szenario verläuft, hängt von verschiedenen Parametern ab. Entscheidend hierfür sind:

- Art und Beschaffenheit der mineralische Dichtung
- Art, Mächtigkeit und Aufbau der Rekultivierungsschicht
- klimatische Verhältnisse (Niederschlag, Verdunstung)
- jahreszeitliche Temperaturverläufe
- Feuchtigkeitszufuhr aus dem Deponiekörper.

So lassen sich auch die unterschiedlichen Ergebnisse verschiedener Aufgrabungen von Oberflächenabdichtungen mit bindigen mineralischen Dichtungen erklären. Stellvertretend sollen hier zwei Projekte dargestellt werden.

Sehr umfassend wurde bisher über das Vorhaben "Wirksamkeit unterschiedlicher Oberflächenabdichtungssysteme auf der Deponie Georgswerder (Hamburg)" (MELCHIOR, 1993; MELCHIOR, VIELHABER & MIEHLICH, 1994) berichtet. Hierbei wurden u. a. mineralische Dichtungen untersucht. Als Material wurde Geschiebemergel (leichtplastischer Ton, gering quell- und schrumpffähig, $k_f \leq 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$) verwendet. Die Dichtsysteme wurden mit einer 25 cm mächtigen Flächendränage, 75 cm Decksubstrat sowie einer Gras- und Krautvegetation bedeckt, die zwei bis dreimal jährlich geschnitten wurde.

Beim Freilegen der mineralischen Dichtung wurden Gefügebildungen, Schrumpfrisse und Kluftflächen zwischen den einzelnen Mergellagen festgestellt. Der Abfluss aus der Flächendränage zeigt einen

charakteristischen Jahresverlauf mit hohen Abflüssen im Winter und im Prinzip ausbleibendem Abfluss im Sommer (MELCHIOR et al., 1994). Das Austrocknen der Dichtung wurde in jedem weiteren Sommer verstärkt und durch die Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln beschleunigt. Einmal gebildete Risse in der Geschiebemergel-Dichtung konnten sich durch Wiederbefeuchtung, Quellung oder Auflast nicht wieder völlig schließen, so dass sie als schnelle Wasserleitbahnen wirkten. Die mineralische Dichtung hatte ihre Wirksamkeit 5 Jahre nach dem Einbau weitgehend verloren. Der in KOCH (1994) besprochene "Selbstheilungseffekt" der bindigen mineralischen Dichtung, bei dem durch Austrocknung entstandene Schrumpfrisse bei erneutem Wasserzutritt infolge Quellung wieder geschlossen werden, wurde durch verschiedene Untersuchungen widerlegt. Das Selbstheilungsvermögen selbst kleinster Zugrisse im μm -Bereich wird ebenso in MALLWITZ & SAVIDIS (1996) und in SAVIDIS et al. (1995) negativ beurteilt.

Das Forschungsvorhaben hat in puncto Wirksamkeit bindiger mineralischer Dichtungen einiges bewegt. Insbesondere wurde aufgezeigt, dass bei diesem Dichtungssystem Wasserhaushaltsuntersuchungen das entscheidende Kriterium sind. Kritisch ist jedoch zu beurteilen, dass zwar im Bereich der Dichtungsschicht umfangreiche bodenphysikalische Untersuchungen vorgenommen wurden, der Bedeutung der Rekultivierungsschicht als einer entscheidenden Systemkomponente jedoch kaum Bedeutung zugemessen wurde.

Neben diesen Untersuchungen wird in HÄMMERLE & LOTTNER (1997) und HÄMMERLE (1997) von Aufgrabungen mineralischer Oberflächenabdichtungen in Bayern berichtet. Hierbei wurden verschiedene Deponien untersucht, deren Oberflächenabdichtung nicht nach TA Siedlungsabfall errichtet wurden. In der Mehrzahl der mit Schürfen untersuchten bindigen mineralischen Dichtungen (Gemisch aus bindigem Kies und Lehm bzw. mittelplastischem Ton-Schluff-Gemisch, $k_f \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$) wurde eine ausreichend mächtige Rekultivierungsschicht eingebaut, die z. T. erheblich über der in der TA Siedlungsabfall geforderten Schichtstärke von 1 m lag.

Der Aufbau der Rekultivierungsschicht besteht dabei i.d.R. aus mehreren unterschiedlichen Bodenarten (Humusschicht über Rohbodenschicht wie Kies-Schluff-Gemische, Kies-Ton-Gemische, Feinsand). Die Untersuchungen ergaben, dass die Wurzeln in schwachbindigen Bereichen der Bodenschicht bei 0,3 m endeten. Nur in bindigen Bereichen bzw. Linsen in der Rohbodenschicht wurden einzelne Pfahlwurzeln bis ca. 1,3 m Eindringtiefe beobachtet. Ein Eindringen von Wurzeln in die Dichtung wurde bei einigen Schürfen mit geringer Schichtstärke der Rekultivierungsschicht (0,6 - 0,8 m) gefunden.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Hamburg-Georgswerder, wurden hier keine Austrocknungsphänomene festgestellt.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Aufbau und Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht erheblichen Einfluss auf das Durchwurzelungsverhalten haben. Weiteres entscheidendes Kriterium ist die Abstimmung von Bodensubstrat und Pflanzenart (Berücksichtigung der Wurzeltiefe). Günstig wirkt sich die Aufbringung eines humusreichen Bodenmaterials im obersten Horizont aus, um durch Gestaltung eines günstigen Wasser- und Nährstoffangebotes das Tiefenstreben der Pflanzenwurzeln zu verringern. Bei der Verwendung von Kompost bzw. Klärschlamm sollten die Technischen Regeln der LABO / LAGA zur "Abfallverwertung auf devastierten Flächen" (1995) bzw. die Klärschlammverordnung in der jeweils gültigen Fassung beachtet werden. Im Kapitel 3.2.3 werden

hierzu weitere Empfehlungen gegeben. Der differenzierte Aufbau der Rekultivierungsschicht (oberer humusreicher Bodenhorizont, gut durchwurzelbare schluffig-lehmige Böden und darunter eine etwas dichtere undurchlässige Schicht) wird durch zahlreiche Arbeiten (z.B. HOLZLÖHNER 1996; EGLOFFSTEIN, BURKHARDT & HEIDRICH 1995) bestätigt und sollte sich in der Praxis durchsetzen. Zur Verringerung der Durchwurzlungsgefahr wird eine Schichtstärke der Rekultivierungsschicht von ≥ 1 m sowie die Nutzung von Simulationsmodellen zur Modellierung des Wasserhaushaltes empfohlen. Entsprechende Empfehlungen werden in Kapitel 3.2.4 bzw. den Anhängen 12 und 13 gegeben.

Herstellbarkeit

Die Einbauphase der Dichtung ist stark witterungsabhängig. Niederschläge verändern den Wassergehalt der bindigen mineralischen Dichtung, wodurch die Verarbeitung stark eingeschränkt ist. Tieferen Temperaturen (< -2 C) schaden durch Eislinnenbildung in der Bauphase und führen zu einer Verringerung der Dichte von Anfang an. Der Bildung von Schrumpfrissen durch Austrocknung im Sommer ist durch Befeuchten und / oder Abdecken vorzubeugen.

Zur Verringerung der Austrocknungsgefahr sollte Material mit einem geringen Wassergehalt eingebaut werden, der deutlich unterhalb des optimalen Wassergehalts liegt. Hydraulisch vorgeschrumpftes Material ist aufgrund seiner geringeren verbleibenden Schrumpfkapazität (Restschrumpfungszustand) dem nach Stand der Technik auf dem nassen Ast der Proctorkurve verdichteten Material hinsichtlich Schrumpf- und damit Rissanfälligkeit überlegen (JUNGE et al., 1996). Für den Einbau bindiger mineralischer Dichtungen wird deshalb empfohlen, hydraulisch vorgeschrumpftes Material mit höherer Verdichtungsenergie auf dem trockenen Ast der Proctorkurve einzubauen. Zum Erhalt einer in sich festen Bodenmatrix sollte bei der Befahrung mit schwerem Baugerät eine Schutzschicht über der Dichtungsschicht aufgebracht werden (HORN, 1988). Generell sollte - im Gegensatz zur Basisabdichtung - wenig schrumpffähiges Material verwendet werden.

Das Material für die mineralische Dichtung soll nach Möglichkeit aus der näheren Umgebung der Ablagerung gewonnen werden. Eine Übersicht über in Sachsen vorhandene Bodenarten ist anhand der *Karte der oberflächennahen Rohstoffe des Freistaates Sachsen 1 : 50.000 (KOR 50)* möglich. Das Kartenwerk steht im LfUG, Abteilung Boden / Geochemie zur Einsichtnahme zur Verfügung.

Unabhängig von den hier dargestellten Möglichkeiten zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit der bindigen mineralischen Dichtung sollten auch andere Systeme / Möglichkeiten wie Ersatz durch eine KDB bzw. Bentonitmatte in die Überlegungen einbezogen werden. Dies gilt insbesondere, wenn entsprechende Materialien nicht Vorort bzw. kostengünstig gewonnen werden können. Derzeit arbeitet die BAM an einer Empfehlung mit dem Inhalt, die mineralische Dichtung durch die KDB zu ersetzen (PREUSCHMANN, 1998).

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für die mineralische Dichtung:

Dichtigkeit	
Gas	- dicht - Bedingung: wassergesättigter, intakter Zustand (bei vorhandenen Rissen Migration von Deponiegas möglich)

Wasser	- Restdurchlässigkeit in Abhängigkeit vom k_f -Wert (ca. 100 mm/a bei hydraulischem Gradienten $i = 1$ und achtmonatiger Versickerungsphase)
Standortanforderungen	
Standortsicherheit	- hoch - ab Neigungen steiler 1:2,5 sind zusätzliche Sicherungsmaßnahmen notwendig
Setzungsempfindlichkeit	- hoch - besonders empfindlich gegenüber Setzungssprüngen - Setzungsmulden mit Verhältnis Tiefe : Durchmesser von $> 1:7$ stellen Belastungsgrenze dar
Platzbedarf	- hoch, besonders am Rand der Deponie
Nachfolgenutzung	- eingeschränkt - nur bei geringen Flächenlasten und Auflastunterschieden, bei baulichen Nutzungen müssen Setzungen abgeklungen sein, Schutz vor Durchdringung der Dichtung durch Versorgungsstraßen muss gewährleistet sein
Beständigkeit	
Austrocknung	- Austrocknungsgefährdung und Rissbildung
Durchwurzelung	- Durchwurzelung möglich - Verringerung / Verhinderung der Durchwurzelung durch ausreichend mächtige Rekultivierungsschicht und eine darauf abgestimmte Vegetation
mechanische Einwirkungen	- Leichte Verletzbarkeit
Langzeitverhalten / Alterung	- In Abhängigkeit vom Wassergehalt Bildung von Rissen möglich
Witterung	- sehr witterungsempfindlich - ausreichende Überdeckung notwendig, sonst Wasserentzug und Verlust der Funktionsfähigkeit der Dichtung innerhalb weniger Jahre
Systemsicherheit	
Redundanz	- Nicht vorhanden
Kontrollierbarkeit	- Nur durch zusätzliche Kontrolleinrichtungen
Reparierbarkeit	- Nach Aufgrabung grundsätzlich möglich
Schwachstellen	- bei Verwendung von bindigem Material besteht Austrocknungsgefahr, Tendenz zum Einsatz von

	gestuftkörnigem oder weniger schrumpffähigem Material (hierzu derzeit kaum Auswertungen vorliegend) bzw. Ersatz durch andere Dichtungselemente
Herstellbarkeit	
Bautechnische Ausführung	- Einbau in 2 Lagen (25 cm bei plastischer Konsistenz)
Anforderungen an die Zulassung von Baustoffen	- Verwendetes Material muss zum Erreichen des vorgegebenen k_f -Wertes gut verdichtbar sein
Witterungsabhängigkeit (Einbau)	- stark witterungsabhängig - Einbau bei Temperaturen $< -2^{\circ}\text{C}$ bzw. stärkeren Niederschlägen nicht möglich, bei starker Sonneneinstrahlung Abdecken bzw. Befeuchten der mineralischen Dichtung notwendig
Qualitätssicherung	- Aufstellen des Qualitätssicherungsplanes nach Nummer 10.4.1.2 TASI mit Eigen- und Fremdprüfung sowie Überwachung durch die zuständige Behörde, Durchführung der Qualitätsprüfung nach Nr.3.2 des Anhangs E TA Abfall
Materialverfügbarkeit	- hoher Aufwand zur Beschaffung des Materials, wenn nicht ortsnahe verfügbar
Gleichwertigkeit	- Regelsystem, Gleichwertigkeitsnachweis nicht notwendig
Kosten	- Gesamtkosten (mit Einbau): 90 - 120 DM/m ² - Einzelkosten: s. Kostenübersicht im Anhang 1
Referenzprojekte	- Deponie "Langebrücker Straße" Dresden - Deponie Tannenhof, LKr Löbau-Zittau - HMD Cunnersdorf, Kreis Kamenz (als temporäre Abdeckung) - Deponie "Wittgensdorf", Wittgensdorf, LKr Mittweida (geplant für Altkörper) - Hartau, LKr Löbau-Zittau

2.3. Gleichwertige Abdichtungssysteme

Nach Nummer 10.4.1.4 Buchst. b TA Siedlungsabfall sind Deponien mit der Regelabdichtung bzw. mit einem gleichwertigen System einer Oberflächenabdichtung abzudichten. Ein bundesweiter

Konsens hinsichtlich der Auslegung des Begriffes "gleichwertig" konnte bisher noch nicht gefunden werden, deshalb liegt derzeit die Entscheidung bei der zuständigen Behörde.

Gleichwertigkeitsnachweis

Ist für eine Oberflächenabdichtung ein alternatives System geplant, muss dessen Gleichwertigkeit nachgewiesen werden. Bei der Beurteilung der Gleichwertigkeit ist zu unterscheiden in

- die Erteilung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung sowie in
- die einzelfallbezogene Beurteilung (Verwendbarkeitsnachweis).

Für Oberflächenabdichtungen wurden bis 1998 allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen vom DIBt für Betonitmatten verschiedener Ausführung für die Deponieklasse I erteilt. Die Gleichwertigkeitsbewertung erfolgte dabei anhand der vom DIBt aufgestellten "Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen". Darin ist ein Katalog von Leistungen festgelegt, den das Dichtelement durch seine Eigenschaften erfüllen muss, um den Einwirkungen (Lastfällen) in seinen Lebensdauerphasen standzuhalten. Als Hauptkriterien sind dabei der Nachweis der Beständigkeit gegenüber ständigen, veränderlichen und außergewöhnlichen Einwirkungen zu erbringen.

Der Nachweis der Eignung im Einzelfall (Verwendbarkeitsnachweis - Variante 2) wurde bisher für die Kapillarsperre erbracht. Hierfür gibt es derzeit keine Möglichkeit zur Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, da hierfür der Nachweis der Wirksamkeit gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen (Wasseraufstau) nicht erbracht werden kann. Für weitere Ausführungen wird auf das Kapitel 2.4.3 verwiesen.

Weiterhin hat sich das DIBt grundsätzlich positiv zum Ersatz der mineralischen Regelabdichtung durch eine geosynthetische Tondichtungsbahn in einem Oberflächenabdichtungssystem der Deponieklasse II nach TASI bei Anwendung zur Oberflächendichtung von Altdeponien geäußert.

Aufgrund eines LAGA-Beschlusses nimmt das DIBt keine länderübergreifenden abfallrechtlichen Aufgaben mehr wahr, womit eine Beurteilung der Gleichwertigkeit durch das DIBt nicht mehr möglich ist.

Die bisher in der BauTechPrüfVwV-Derp vorhandene Regelung, dass der erstellte Gleichwertigkeitsnachweis durch eine anerkannte Prüfstelle beurteilt werden muss, wird dahingehend geändert, dass die zuständige Behörde zur Beurteilung des Gleichwertigkeitsgutachtens einen unabhängigen Sachverständigen ihrer Wahl zur Entscheidungsfindung einschalten kann.

2.4. Alternative Abdichtungssysteme

2.4.1. Kunststoffdichtungsbahnen

Kunststoffdichtungsbahnen haben sich in der bisherigen Praxis der Oberflächenabdichtung von Ablagerungen als das wirksamste Abdichtungselement erwiesen. Bei geeigneter Materialauswahl und

Verarbeitung haben sie eine außerordentlich lange Funktionsdauer. Unter Kunststoffdichtungsbahnen werden hier ausschließlich die für den Anwendungszweck Deponieabdichtung von der BAM speziell zugelassenen PEHD-Dichtungsbahnen verstanden.

Dichtigkeit

Kunststoffdichtungsbahnen sind gas- und wasserdicht.

Standortanforderungen

Die KDB ist standsicher bis zu Böschungsneigungen von etwa 1:4. Bei Neigungen steiler als 1:4 sollte in jedem Fall ein rechnerischer Standsicherheitsnachweis geführt werden. Neigungen bis 1:3 sind i. d. R. beherrschbar, ab Neigungen über 1:3 können zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der Standsicherheit, z. B. Rückverankerung durch zugfeste Gitter, notwendig werden. Die KDB ist setzungsunempfindlich bis zum Erreichen der Streckgrenze, da Zugspannungen aufgenommen werden können. Danach kommt es zum Riss. Die langfristig zulässige biaxiale Verformung der PEHD-Dichtungsbahn liegt bei einer Temperatur von 40°C bei 3%. Wenn deutlich niedrigere Temperaturen nicht überschritten werden, können höhere Verformungswerte zugelassen werden (MÜLLER & AUGUST 1997).

Beständigkeit / Systemsicherheit

Die KDB wirkt als Wurzel- und Konvektionssperre (keine Austrocknungsgefahr). Gegenüber den relevanten Stoffen im Gaskondensat ist die Kunststoffdichtungsbahn weitgehend resistent. Aufgrund von Zeitstandsversuchen wird die Funktionsdauer der KDB mit mindestens 100 Jahren angegeben (MÜLLER & AUGUST, 1997).

Herstellbarkeit

Die KDB muss über eine Zulassung gemäß BAM-Richtlinie (1992) verfügen. Diese gilt auch für eine Einzelverlegung der KDB (PREUSCHMANN, 1998). In der Richtlinie sind insbesondere folgende Bereiche geregelt:

- Werkstoff, Abmessung, Oberflächenbeschaffenheit, Herstellungsverfahren der KDB
- Antragsteller, Prüfverfahren und Anforderungen an die KDB
- Überwachung, Einbau der KDB, Qualitätssicherung.

Es sind derzeit nur Kunststoffdichtungsbahnen aus rußstabilisierten PEHD-Formmassen zugelassen. Die Mindeststärke der KDB muss 2,5 mm, die Breite mindestens 5 m betragen. Die Oberfläche kann beidseitig glatt oder ein- bzw. zweiseitig profiliert sein. Derzeit gibt es 4 Hersteller, die eine Zulassung durch die BAM besitzen. Neben der Darstellung der Prüfverfahren hinsichtlich physikalischer, physikalisch-mechanischer, kombinierter physikalisch-chemischer und chemisch-biologischer Anforderungen wird insbesondere der Bereich der Verlegung der Kunststoffdichtungsbahnen mit folgenden Schwerpunkten besprochen:

- korrekter Transport und geeignete Lagerung der Bahnenrollen
- Koordination der Gewerke
- sofortiges Verlegen der KDB auf einer abgenommenen mineralischen Dichtungsschicht
- Ballastierung und Abdeckung der KDB
- Garantie einwandfreier Schweißnähte durch:
 - weitgehende Automatisierung des Schweißvorganges und lückenlose Dokumentation der für die Erreichung einer einwandfreien Schweißnaht relevanten Parameter
 - Qualifikation des Personals (s. u.)
 - Ermittlung der optimalen Schweißparameter aus Probeschweißungen zum Schichtbeginn, bei relevanten Unterbrechungen, Witterungsänderung und bei sonstigen Anordnungen des Fremdprüfers.

Die Verlegung der KDB hat nach einem von der zuständigen Fachbehörde und dem Fremdüberwacher freigegebenen Verlegeplan zu erfolgen.

Die Bahnen werden i. d. R. durch Überlappnähte mit Prüfkanal (Doppelnähte) mit Heizkeilschweißmaschinen gefügt. In Ausnahmefällen dürfen handgeschweißte Auftragsnähte mittels Extrusionsschweißen nach vorheriger Heftung hergestellt werden. Die Schweißzusätze müssen aus der gleichen Formmasse bestehen. Alle Doppelnähte werden mit Überdruck (Prüfkanal) bzw. Auftragsnähte mit Unterdruck (Saugglocke) auf Dichtigkeit geprüft. Die Verlegung der KDB hat faltenfrei und ohne Eigenspannung durch Temperaturveränderungen o. ä. zu erfolgen.

Die Ausbildung des Personals fordert neben der Schweißfachausbildung der Baustellenmitarbeiter ein abgeschlossenes Ingenieurstudium des Fachbauleiters mit 3-jähriger praktischer Tätigkeit auf dem Gebiet sowie der Qualifikation nach DVS 2213. Die Bahnschweißer müssen gültige Prüfbescheinigungen gemäß DVS-Richtlinie 2212, Teil 3, "Prüfung von Kunststoffschweißern, Prüfgruppe III, Bahnen im Erd- und Wasserbau", mindestens Untergruppe III-1, III-2, III-3 nachweisen.

Im Rahmen der Eigenüberwachung sind die äußere Beschaffenheit, Abmessungen, Festigkeit und Dichtigkeit der Nähte nach der DVS-Richtlinie 2225, Teil 2, "Baustellenprüfungen" zu prüfen.

Die Prüfungen der Eigenüberwachung und der Fremdüberwachung gemäß DIN 18200 hat so zu erfolgen, dass die Prüfergebnisse vor Aufbringen der Schutz- und Entwässerungsschicht vorliegen, um evtl. notwendige Reparaturen durchführen zu können. Während der Verschweißarbeiten sind in Abhängigkeit spezifischer Materialeigenschaften der KDB, entsprechend der BAM-Richtlinie und in Anlehnung an die DVS 2225 Teil1 Umgebungsbedingungen und Schweißparameter aufeinander abzustimmen. Bei Niederschlägen und Temperaturen unter 5°C sind entsprechende Schutzvorkehrungen (z.B. Zelt) zu treffen. Bei hoher Welligkeit in Folge starker Sonneneinstrahlung darf nicht verschweißt werden.

Zum 01.01.1997 wurden durch die BAM neue Zulassungsscheine (für KDB und Schutzschichten, MÜLLER & AUGUST, 1997.) erstellt. Neben formalen Änderungen, die der Vereinheitlichung der Zulassungsdokumente dienen, ergaben sich zwei wesentliche Änderungen:

1. Die bisher im Hinblick auf unklare Zuständigkeitsregeln vorgenommene Befristung entfällt. Es wird somit eine zeitlich unbefristete Zulassung erteilt, wenn die Anforderungen der Zulassungsrichtlinie erfüllt werden. Einschränkungen gelten, wenn z. B. der für die KDB vorgesehene Werkstoff nur noch befristet hergestellt wird. Technische Weiterentwicklungen und Verbesserungen werden in der Art berücksichtigt, dass in der Zulassung ein Widerrufsvorbehalt verankert ist. Bei Berücksichtigung der Weiterentwicklungen nach dem Stand der Technik kann die Zulassung erneut erteilt werden (MÜLLER & AUGUST, 1997).

2. Die Einbindung der Verlegefirmen wird neu geregelt. Bisher wurden in den erteilten Zulassungen die mit dem Hersteller zusammenarbeitenden und autorisierten Fachverleger namentlich aufgeführt. Nur diese Firmen konnten die vom jeweiligen Hersteller produzierten KDB verlegen. Abweichungen bedurften der schriftlichen Zustimmung durch die BAM. Seit 1997 ist auch aus wettbewerbsrechtlichen Gründen eine Trennung von Dichtungsbahnenherstellung und -verlegung möglich. Um trotzdem entsprechende Qualität zu garantieren, wurde von der BAM eine "Empfehlung der für die Anforderungen an die Qualifikation und die Aufgaben eines Fachbetriebes" für die Verlegung von Kunststoffdichtungsbahnen erarbeitet. Parallel und auf Grundlage der Empfehlungen der BAM hat der Überwachungsausschuss des Arbeitskreises Grundwasserschutz e. V. (AK GWS) die "Ordnung über die Durchführung des Überwachungsverfahrens" erarbeitet. Diese Überwachungsverordnung trat am 15.07.1997 in Kraft. Hierin sind exakte Anforderungen sowohl an das Personal als auch an die Qualitätssicherung und Maschinenausstattung des Verlegebetriebes gestellt. Der Fachbetrieb hat mindestens über einen Fachbauleiter, einen QM-Beauftragten und 5 Bahnenschweißer zu verfügen. Des weiteren ist ein betriebseigenes Qualitätsmanagementhandbuch zu führen, das den Anforderungen der DIN EN ISO 9000 entspricht. Der Fachverleger muss über einen ausreichenden Gerätepark verfügen, um auf mehreren Baustellen fachgerecht installieren zu können.

Die in der o.g. Verordnung geforderte Überwachung der Einzelbetriebe erfolgt im Auftrag des Überwachungsausschusses des AK WS durch die BAM (ALBERS, 1997, PREUSCHMANN, 1998).

Aufgrund der geringen Stärke der KDB ist diese leicht perforierbar und mit entsprechenden Schutzschichten zu beauflagen. Dazu sollten nur durch die BAM zugelassene Schutzschichten verwendet werden (BAM, 1995). Zulassungen durch die BAM werden hierbei für folgende Systeme erteilt:

- Schutzschichten aus geotextiler und mineralischer Schutzlage, bestehend aus einem Vliesstoff mit einer Masse pro Flächeneinheit von mindestens 1200 g/cm^2 oder einer anderen geotextilen Schutzlage mit zusätzlicher lastverteilernder mineralischer Schutzlage. Dabei wird kalkarmes Brechkorn der Körnung 0/8 gefordert, wobei auch Sekundärbaustoffe eingesetzt werden können, deren Körnungslinien einem filterstabilem Aufbau entsprechen
- Schutzschichtsystem aus verpacktem Sand, das in unterschiedlicher Weise mit Geotextilien verpackt wird. Hierbei handelt es sich um werkmäßig teilweise oder vollständig vorgefertigte Komplettsysteme.

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für die Kunststoffdichtungsbahn (als alleiniges Dichtungselement):

Dichtigkeit	
Gas	- dicht
Wasser	- dicht
Standortanforderungen	
Standicherheit	- begrenzt durch Scherfestigkeit der Kontaktfläche KDB-Auflager bzw. KDB-Schutzschicht - ab Neigung 1:4 sind Stand sicherheitsnachweise zu führen - ab Neigung 1:3 zusätzliche Maßnahmen notwendig (z. B. Rückverhängen durch zugfeste Geogitter)
Setzungsempfindlichkeit	- gute Verformungsaufnahme der KDB - langfristige mehraxiale Dehnung von max. 3% ohne Schäden aufnehmbar
Platzbedarf	- gering
Nachfolgenutzung	- eingeschränkt
	- nur bei geringen Flächenlasten und Auflastunterschieden, bei baulichen Nutzungen müssen Setzungen abgeklungen sein, Schutz vor Durchdringung der Dichtung durch Versorgungsstraßen
Beständigkeit	
Austrocknung	- keine Austrocknung
Durchwurzelung	- keine Durchwurzelung

mechanische Einwirkungen	- leichte Verletzbarkeit durch scharfkantige Körner, Einbau eines Schutzvlieses empfohlen
Langzeitverhalten / Alterung	- BAM-zugelassene KDB: ca. 100 Jahre beständig
Witterung	- nach Einbau relativ witterungsunabhängig durch Überdeckung mit weiteren Schichten, KDB durch Rußpigmentierung UV-stabil
Systemsicherheit	
Redundanz	- nicht vorhanden
Kontrollierbarkeit	- nur durch zusätzliche Kontrolleinrichtungen
Reparierbarkeit	- nach Freilegung grundsätzlich möglich
Schwachstellen	- Schweißnähte, Durchdringungen
Herstellbarkeit	
Bautechnische Ausführung	- Verlegung gemäß BAM-Richtlinie - (Überlappnähte mit Prüfkanal – Doppelnähte – im Heizkanalverfahren, Personal: Schweißfachausbildung nach DVS-Richtlinie 2213)
Anforderungen an die Zulassung von Baustoffen	- BAM-Zulassung
Witterungsabhängigkeit (Einbau)	- stark witterungsabhängig - Einbau bei Temperaturen < 5°C sowie bei Niederschlägen, sehr starker Sonneneinstrahlung und auf Flächen mit anstehendem Wasser nicht möglich
Qualitätssicherung	- Aufstellen des Qualitätssicherungsplanes nach Nummer 10.4.1.2 TASi mit Eigen- und Fremdprüfung sowie Überwachung durch die zuständige Behörde, Durchführung der Qualitätsprüfung nach Nr. 3.2 des Anhangs E TA Abfall, Berücksichtigung der DVS-Richtlinie 2225 im Rahmen der Eigenüberwachung bei der Verlegung der KDB
Materialverfügbarkeit	- unproblematisch, verschiedene Anbieter
Gleichwertigkeit	- nicht vorhanden
Kosten	- Gesamtkosten (mit Einbau): 90 - 110 DM/m ² - Einzelkosten: s. Kostenübersicht im Anhang 1
Referenzprojekte	- HMD Hufe-Pulsnitz, LKr Kamenz - Deponie Am Wachberg LKr Kamenz - Deponie Grimma-Süd (Muldentalkreis)

- (Deponie Rennersdorf, LKr Sächsische Schweiz, bisher temporäre Abdeckung mit 0,8 mm KDB)
--

2.4.2. Kontrollierbare Oberflächenabdichtungen

Für Ablagerungen von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, die der TA Abfall (1991) unterliegen, wird durch Nummer 9.4.1.4. die kontrollierbare Oberflächenabdichtung gefordert. "Das Deponieoberflächenabdichtungssystem ist so auszuführen, dass Undichtigkeiten für die Dauer der Nachsorge lokalisiert und repariert werden können." In Anhang G heißt es weiter "Die Funktion des Deponieoberflächenabdichtungssystems ist regelmäßig zu kontrollieren. Bei festgestellten Leckagen sind diese unverzüglich zu reparieren."

Bei Deponien, die in den Geltungsbereich der TA Siedlungsabfall fallen, besteht zwar keine zwingend formulierte Notwendigkeit zur Errichtung eines kontrollierbaren Oberflächenabdichtungssystems, unter Nummer 10.6.6.2. und 10.7 TA Siedlungsabfall werden aber Einrichtungen zur Überwachung der Funktionsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen während der Betriebs- und in der Nachsorgephase gefordert. In diesem Zusammenhang wird auf Anhang G der TA Abfall (1991) verwiesen.

Allgemein kann die Errichtung kontrollierbarer Systeme unter dem Blickpunkt des UMWELTHAFTUNGSGESETZES (1990) sinnvoll sein. Nach § 8 dieses Gesetzes muss der Inhaber einer Anlage im Falle eines Umweltschadens nachweisen, dass er nicht als Verursacher dieses Schadens in Frage kommt. Eine lückenlos dokumentierte Funktionstüchtigkeit der Dichtungen ist hierbei eine Möglichkeit.

Funktionsprinzipien

Für die Erkennung von Leckagen an Oberflächenabdichtungssystemen wurden bisher folgende Möglichkeiten genutzt:

- Überwachung des Grundwassers durch Grundwassermessstellen
- Wasserhaushaltsbilanzen
- Kontrollräume und Dränagesysteme
- Flächige Überwachung mittels elektronischer Sensoren (Leckortungssysteme).

Nur mit elektronischen Sensorsystemen ist eine unmittelbare und ortsgenaue Kontrolle der Funktionstüchtigkeit von Abdichtungen möglich, so dass an dieser Stelle ausführlicher nur diese Methodik dargestellt wird.

Bei der Kontrolle von Deponieabdichtungen mittels elektronischer Sensorsysteme kamen bisher folgende Messprinzipien zum Einsatz:

- Flächenmessung elektrischer Eigenschaften
- Flächenmessung der Temperaturverteilung.

Eine Leckage wird durch eine auftretende Anomalie der jeweiligen gemessenen physikalischen Größe angezeigt. Dabei können die Messungen kontinuierlich, periodisch oder ereignisabhängig durchgeführt werden. Eine Charakterisierung der Undichtigkeit erfolgt qualitativ (ja / nein, wo), eine quantitative Erfassung, z.B. der Größe einer Leckage oder durchströmende Sickerwassermengen, ist nicht möglich. Die Ortungsgenauigkeit hängt von der gewählten Rastergröße und Anordnung der Elektroden ab und kann bis in den Dezimeter-Bereich liegen.

Voraussetzung ist das Vorhandensein eines elektrisch isolierenden Dichtungselementes, wie bei Oberflächenabdichtungen die KDB. Die elektrisch isolierende Wirkung der KDB geht im Bereich einer Leckage verloren und kann durch flächige Potentialfeld- oder Widerstandsmessung genau geortet werden. Neben fest installierten Systemen, bei denen die Elektroden unter- und / oder oberhalb der KDB auf ihrer gesamten Fläche verlegt werden, ist auch ein mobiles System bekannt, das keinerlei fest eingebaute Komponenten benötigt. Dabei werden Elektroden für die Dauer der Messung oberhalb der zu überprüfenden Fläche temporär verlegt und weitere Elektroden neben der Abdichtung in Grundwassermessstellen eingehängt.

Mit der Flächenmessung elektrischer Eigenschaften in Kombination mit einem isolierenden Element wurde bei Oberflächenabdichtungen bislang die meiste praktische Erfahrung gesammelt. Da diese Verfahren verhältnismäßig neu sind, liegen über langfristige, beispielsweise für die Dauer der Nachsorgephase während Überwachungen, noch keine Erfahrungen vor.

Weitere Systeme sind in Entwicklung, die auch die Leckortung von mineralischen Dichtungselementen, beispielsweise über faseroptische Messung der Temperaturverteilung oder der Messung der Feuchteverteilung, erlauben.

Dichtigkeit

Diese kontrollierbare Oberflächenabdichtung besteht aus den Dichtelementen und dem Kontrollelement. Die Kunststoffdichtungsbahn ist wie im Punkt 2.4.1. beschrieben gas- und wasserdicht. Das Leckortungssystem als Kontrollelement hat keine Dichtfunktion.

Beständigkeit

Da noch keine langjährigen Erfahrungen über den Einsatz dieser Systeme vorliegen, sind über die Lebensdauer nur begrenzte Aussagen möglich. Herstellergarantien von 10 Jahren bzw. Angaben von 15 Jahren und längerer Lebensdauer sind bekannt, ebenso wie mehrjähriger störungsfreier Betrieb fest installierter Systeme. Die Hersteller der Leckortungssysteme setzen für Elektroden und Kabelverbindungen entsprechend korrosionsbeständige und isolierte Materialien ein, die speziell für die Erdverlegung ausgelegt und auch gegen mechanische Beanspruchung (Setzungen) unempfindlich sind.

Systemsicherheit

In der Regel werden die Elektroden so angeordnet, dass jede Stelle der Abdichtung von mehreren Messmodulen gleichzeitig kontrolliert wird. Darüber hinaus enthält die zum System gehörende Software verschiedene Messalgorithmen, die neben der Überwachung der Oberflächenabdichtung und der Ortung von Leckagen auch umfangreiche Selbsttests für das Messsystem und

Funktionskontrollen der erdverlegten Komponenten ermöglichen. Unregelmäßigkeiten führen automatisch zu einem Systemalarm.

Herstellbarkeit / Standortanforderungen

Bei der Installation sind nur relativ geringfügige Auswirkungen auf den allgemeinen Bauablauf zu erwarten. Für die unmittelbar in der Oberflächenabdichtung verlegten Systemkomponenten fallen kaum zusätzliche Erdarbeiten an. In Abhängigkeit des ausgewählten Systems können Kabelgräben für die Weiterführung der Busleitungen bis zur Mess- und Auswertungsseinheit notwendig werden. Diese Mess- und Auswerteeinheiten gibt es in mobiler bzw. tragbarer Ausführung. Für die Unterbringung einer permanenten Mess- und Auswertestation muss gegebenenfalls ein Container mit Telefonanschluss bereitgestellt werden, sofern nicht ohnehin vorhandene Gebäude genutzt werden können.

Der Einbau kann witterungsabhängig sein, wenn systembedingt die Einbettung der Elektroden und Busleitungen als Flachkabel in die Schichten des Dichtungssystems notwendig wird. Der Platzbedarf für ein elektronisches Leckortungssystem ist sehr gering.

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für Kontrollierbare Oberflächenabdichtungen:

Dichtigkeit	
Gas	- dichtendes Element: KDB
Wasser	- dichtendes Element: KDB
Standortanforderungen	
Standicherheit	- vergleichbar mit Kombinationsabdichtung
Setzungsempfindlichkeit	- setzungsaufnehmende Konstruktionen möglich
Platzbedarf	- gering
Nachfolgenutzung	- um eine rasche Reparierbarkeit der kontrollierten Fläche zu ermöglichen, sollte kein Gehölzwachstum zugelassen werden
Beständigkeit	
Austrocknung	- für Kontrollelement nicht relevant
Durchwurzelung	- für Kontrollelement nicht relevant
Mechanische Einwirkungen	- empfindlich gegen punktförmige Durchdringungen
Langzeitverhalten / Alterung	- keine langjährigen Erfahrungen, Herstellergarantien bis 10 Jahre
Witterung	- nach Einbau relativ witterungsunabhängig durch Überdeckung mit weiteren Schichten
Systemsicherheit	
Redundanz	- sich überlappende Messbereiche der Sensoren

Kontrollierbarkeit	- Selbsttests mit Systemalarm
Reparierbarkeit	- nach Aufgrabung grundsätzlich möglich
Schwachstellen	-(in Abhängigkeit vom System geringe Standsicherheit)
Herstellbarkeit	
Bautechnische Ausführung	- Konfiguration durch Hersteller
Anforderungen an die Baustoffe	- Komponenten sollen sehr alterungsbeständig und einfach handhabbar sein
Witterungsabhängigkeit (Einbau)	- Gering
Qualitätssicherung	- Prüfung der Kontrollsysteme sofort nach Fertigstellung, Referenzmessung - Überwachungsprogramm nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, Eigen- und Fremdüberwachung sind nachzuweisen
Materialverfügbarkeit	- Verschiedene Anbieter
Gleichwertigkeit	- Verwendbarkeitsnachweise erstellt
Kosten	- Gesamtkosten (mit Einbau): 140 - 170 DM/m ² - Einzelkosten: s. Kostenübersicht im Anhang 1
Referenzprojekte	- Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen (Niedersachsen) - Deponie Waldering / Rosenheim (Monodeponie für MVA-Schlacken) - Sonderabfalldeponie Raindorf, Rednitzhembach - Igelsdorf - Deponie Muckensturm, Weinheim - Deponie Ihlenberg / Lübeck - Hausmülldeponie Haslbach / Regensburg - Altablagerung Hannover-Bemerode (Hausmüll) (Leckortung mittels flächiger elektrischer Messung)

2.4.3. Kapillarsperre

Die Kapillarsperre wird als Alternative zum Regelsystem nach TA Siedlungsabfall seit Ende der 80-iger Jahre in verschiedenen Projekten intensiv erprobt. Eine Anwendung findet sie in Hangbereichen von Deponien und Altablagerungen. Die Kapillarsperre besteht aus 2 Schichten, einer Kapillarschicht

aus Sand und einer grobkörnigen Schicht als Kapillarblock. In Abb. 3 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt.

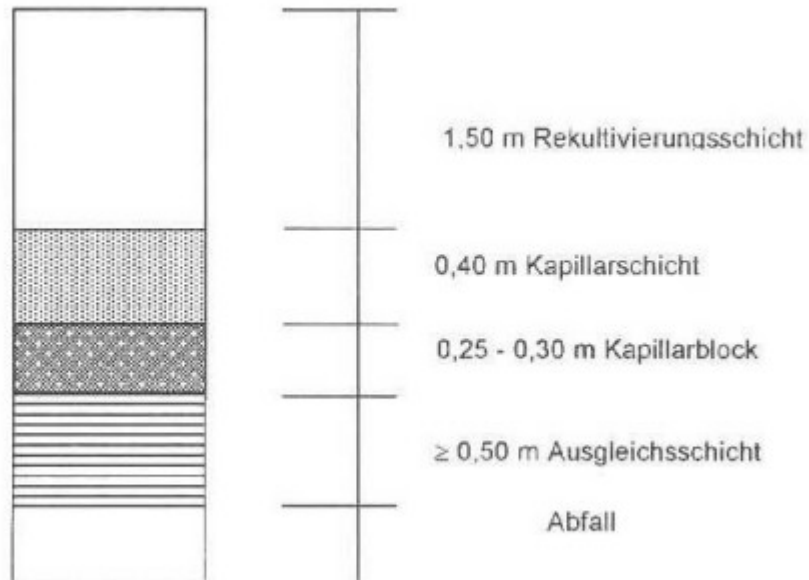


Abb.3: Aufbau der Kapillarsperre

Die Funktion der Kapillarsperre beruht auf der Kombination zweier Materialien - Kapillarschicht und Kapillarblock - mit ausgeprägten Unterschieden ihrer hydraulischen Eigenschaften. Das Porensystem der feinkörnigeren Kapillarschicht muss in der Lage sein, Wasser gegen die Schwerkraft zu halten und über eine hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeit verfügen. Die dichtende Wirkung wird durch den ausgeprägten Porensprung zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock (kapillare Trennschicht) bewirkt. Durch die unter ungesättigten Verhältnissen vorhandene höhere hydraulische Leitfähigkeit der Kapillarschicht wird das eindringende Niederschlagswasser nach dem Prinzip der "hängenden Menisken" in der Kapillarschicht fixiert und fast vollständig lateral abgeleitet. Bedingung für die Funktionsfähigkeit ist der Einbau der Kapillarsperre auf einer Hangneigung von 1:2,5 bis 1:10. Bei der aktuellen Planung zur Sicherung der Deponie Penig (Landkreis Mittweida) liegt eine Hangneigung von 1:6 vor.

Dichtigkeit

Kapillarsperren sind unter Hangbedingungen leistungsfähige Barrieren für die vertikale Wasserbewegung. Im Gegensatz zu bindigen mineralischen Dichtungen, die nahe Sättigung wirksam sind, bei Austrocknung durch Schrumpfrisse jedoch unwirksam werden, haben Kapillarsperren ihre Dichtwirkung unter wasserungesättigten Bedingungen. Die Restdurchsickerung wird mit unter 1% angegeben (AMANN & JELINEK; 1996; V. D. HUDE, 1996). Bei zu hoher Zudosickerung (z. B. Durchbruchereignis bei Starkregen) wird die Leistungsfähigkeit der Kapillarschicht beim Erreichen gesättigter Verhältnisse überschritten, so dass Wasser in den Kapillarblock sickert. Sobald sich die ungesättigten Verhältnisse wiedereinstellen, erreicht die Kapillarsperre wieder ihre ursprüngliche

Dichtigkeit (MELCHIOR et al., 1995; v. D. HUDE, JELINEK & KÄMPF, 1994). Als Maß der Leistungsfähigkeit der Kapillarschicht wird die hangparallele bzw. laterale Dränkapazität angegeben.

Gegen Deponiegas stellt die Kapillarsperre keine Barriere dar.

Standortanforderungen

Die Kapillarsperre kann auf geneigten Flächen mit einer Hangneigung bis zu 1:10 eingesetzt werden. Bei sehr langen Hängen oder erwartungsgemäß hohen Zusickerungsraten muss der Kapillarschichtabfluss bereits am Mittelhang gefasst werden, um den Hangfuß nicht zu überlasten (v. D. HUDE, JELINEK & KÄMPF; 1994). Als Sicherheit vor Unregelmäßigkeiten beim Einbau und zur Verteilung punktuell zusickernden Wassers wird eine Mächtigkeit der Kapillarschicht von 40 cm und des Kapillarblockes von 25 - 30 cm empfohlen.

Kapillarsperren sind auf steileren Hängen einsetzbar als z. B. die Kombinationsabdichtung. Untersuchungen an der TH Darmstadt und an der Universität Hamburg haben gezeigt, dass Kapillarsperren weniger empfindlich gegenüber Setzungsdifferenzen sind. In v.D. HUDE (1999) wurde beschrieben, dass ein sägezahnartiger Höhenversatz der Grenzfläche zwischen beiden Schichten um 5 cm nicht zum Versagen der Dichtung führt. Da Verformungen nicht zu einer Porositätsveränderung führen, bleiben die Kapillareigenschaften erhalten. Durch eine ausreichende Böschungsneigung wird die Bildung von Taschen verhindert, in denen sich Sickerwasser ansammeln kann (WOHNLICH, 1994).

Beständigkeit

Kapillarsperren sind gegenüber Austrocknung sowie Frost-Tau-Wechseln unempfindlich. Ebenso besteht nur eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Wurzeleinwirkung. Die Ausbildung eines dichten Wurzelfilzes in der Kapillarschicht kann deren ungesättigte Wasserleitfähigkeit zwar verringern, der Wasserentzug durch Pflanzenwurzeln ist jedoch im Gegensatz zu mineralischen Dichtungen unkritisch.

Zur Vergleichmäßigung und Rückhaltung verstärkt eindringenden Wassers sollte eine Rekultivierungsschicht von mind. 1,5 m aufgebracht werden.

Nach Durchbruchereignissen erfolgt i. d. R. eine schnelle Regeneration, die Kapillarsperre erhält ihre Funktionsfähigkeit zurück. Diese Eigenschaft ist der grundlegende Vorteil der Kapillarsperre im Vergleich zu allen anderen Abdichtungssystemen.

Systemsicherheit

Kapillarsperren sind aufgrund ihres Wirkprinzips generell nur in Hangbereichen (1:2,5 bis 1:10) einsetzbar. Die Gleitsicherheit ist wesentlich höher als die der Regelsysteme und wird i. d. R. durch die Materialparameter der übrigen Systemkomponenten begrenzt. Kapillarsperren sind verformungsbeständiger als bindige mineralische Dichtungen und leicht reparabel (AMANN & JELINEK, 1996). Die Wirksamkeit von Kapillarsperren hängt entscheidend von der Materialkombination (Kapillarschicht- und -blockmaterial) und von der Hangneigung ab. Weitere entscheidende Faktoren sind Hanglänge und die Zusickerung in die Kapillarschicht.

Die Kapillarsperre kann als Alternative für das Regelabdichtungssystem (DK I) bzw. als eine Komponente (DK II) verwendet werden, wenn sie zu den Regelabdichtungssystemen gleichwertig ist. Diese Eignung ist nachzuweisen. Die Bewertung der Eignung der Kapillarsperre erfolgt auf der Basis einer objektkonkreten Eignungsprüfung, da die Eigenschaften und Leistungen einer Kapillarsperre nur im Zusammenhang mit den örtlichen Gegebenheiten (Neigung, Hanglänge, Aufbau und Zusammensetzung von Kapillarschicht und -block, Niederschlag, Absickerung aus der Rekultivierungsschicht) angegeben werden können. In Kipprinnenversuchen ist die Eignung einer Materialkombination für Kapillarschicht und -block anhand der örtlichen Randbedingungen zu erbringen.

Zur Vertiefung und Untersetzung der bisherigen Kenntnisse über die Anwendbarkeit der Kapillarsperre wird in Sachsen ein Modellstandortvorhaben Kapillarsperre durchgeführt. Hierbei sollen insbesondere Erfahrungen bei der Planung und Erstellung einer vollflächigen Ausführung des Systems gesammelt werden. Derzeit wird für einen potentiell geeigneten Standort (Altdeponie Penig) die Abschlußplanung für das Oberflächenabdichtungssystem getrennt für die Regelabdichtung nach TA Siedlungsabfall, Deponieklasse II, sowie parallel dazu für das System Kapillarsperre über KDB durchgeführt.

Die zu sichernde Deponie (Hausmüll) wurde zum 01.12.1997 geschlossen. Es ist davon auszugehen, dass die in der TA Siedlungsabfall vorgesehenen Maßnahmen erforderlich sind. Durch den wissenschaftlichen Erfahrungsträger wurde ein Verwendbarkeitsnachweis erstellt, der seitens der Fachbehörden geprüft wurde. Im Rahmen der Abschlußplanung wurde bis zur Phase der Entwurfsplanung ein Variantenvergleich Regelabdichtung nach TA Siedlungsabfall bzw. alternativ Kapillarsperre über KDB geprüft. Der Einsatz der Kapillarsperre wurde befürwortet.

Herstellbarkeit

Grundlegende Voraussetzung für die Wirksamkeit der Kapillarsperre ist die Ausbildung einer ebenen Trennfläche zwischen Kapillarschicht und -block. Der Einsatz eines Trennvlieses erleichtert zwar den Einbau, erhöht jedoch die Kosten. Zusätzlich sind dann die entstehenden Gleitfugen in die Standsicherheitsberechnungen einzubeziehen. Die Kapillarsperre ist unempfindlich gegenüber Witterungseinflüssen in der Bauphase (Ausnahme Starkregenereignisse und Sandeinwehungen in den Kapillarblock).

Kapillarsperren müssen aus enggestuften Materialien mit geringer Ungleichförmigkeit aufgebaut sein. Für die Kapillarschicht sind eng gestufte Sande und Kiese zu verwenden. Der Ton- und Schluffgehalt sollte unter 2% liegen, um eine ausreichend hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeit ($k_f \geq 10^{-4}$ m/s, MELCHIOR et al.; 1995) der Kapillarschicht bei pH-Werten zwischen 1 und 2,5 sicher zustellen. Das Material für den Kapillarblock (eng gestufter Kies) soll im Rahmen der Filterstabilität einen größtmöglichen Porensprung zur Kapillarschicht gewährleisten und eine geringe ungesättigte Wasserleitfähigkeit aufweisen. Beide Materialien sollen eine möglichst steile und weit auseinanderliegende Sieblinie aufweisen (MELCHIOR et al., 1995).

Aufgrund der hohen Anforderungen ist die Materialverfügbarkeit bei diesem System nicht immer gegeben. Schwierigkeiten können sich insbesondere bei der Suche nach geeigneten Materialien für den Kapillarblock ergeben. Natürlich anstehendes Material muss i. d. R. aufbereitet werden. In

verschiedenen Projekten (v.d.HUDE & HOPPE, 1997) wird der Einsatz von Reststoffen - Abfall zur Verwertung (Gießereiformsande für die Kapillarschicht, Schlacke für den Kapillarblock) untersucht. Kostenerhöhend kann sich jedoch hier die großtechnische Aufbereitung der Ausgangsmaterialien (Brechen, Sieben) auswirken. Beim Einsatz von Abfall zur Verwertung sind die Zuordnungswerte für den Einbau der Technischen Regeln der LAGA "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen" (1997) zu beachten. Hierbei ist vor allem die Kornstabilität zu beachten.

Nach einer Materialvorauswahl anhand der Korngröße sollten Eignungsprüfungen in Kipprinnenversuchen erfolgen. Die Rinnen sollten mindestens 8 m lang sein, um Einflüsse der Wasserfassung auf die Wasserbewegung in der Kipprinne zu erkennen und bei der Auswertung ausschließen zu können. Die zu untersuchenden Hangneigungen und Zuflussraten sind von den geometrischen und klimatischen Randbedingungen des jeweiligen Standortes abhängig zu machen. Die Mächtigkeit sollte aus baupraktischen Gründen für die Kapillarschicht 40 cm und für den Kapillarblock 25-30 cm nicht unterschreiten. Beim Einbau der Materialien sind mechanische Einwirkungen auf die Grenzfläche zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock zu minimieren, indem die Kapillarschicht in ausreichender Mächtigkeit vor Kopf vom Hangfuß aus eingebaut wird. Die Mächtigkeit der Mindestüberdeckung der Grenzfläche vor Befahren der Kapillarschicht kann im Probefeld ermittelt werden. Der Anschluss von Baufeldern in Hangrichtung muss sorgfältig überwacht werden. Gleiches gilt für die Herstellung der Wasserfassung aus der Kapillarschicht. Die Qualitätssicherung beim Einbau ist ansonsten im Vergleich zu anderen Dichtsystemen weniger aufwendig. Der seitliche Anschluß von Baufeldern sowie vertikale Rohrdurchdringungen sind unkritisch.

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für die Kapillarsperre:

Dichtigkeit	
Gas	- nicht dicht
Wasser	- dicht - Bedingung: eindringendes Niederschlagswasser im Rahmen des Fassungs- und Wasserleitvermögens der Kapillarschicht – laterale Dränkapazität (bei Überlastung sind Sickerwasserdurchbrüche möglich, Dichtigkeit wird nach Abklingen des Ereignisses wieder erreicht)
Standortanforderungen	
Standssicherheit	- unproblematisch - Hangneigungen zwischen 1:2,5 und 1:10 sind möglich, zur Sicherung der Funktionsfähigkeit ist 1:10 nicht zu unterschreiten, bei großen Hanglängen oder hohen Abflußraten sind zusätzliche Fassungssysteme am Mittelhang vorzusehen

Setzungsempfindlichkeit	- gering - wenig empfindlich bei Setzungssprüngen
Platzbedarf	- hoch
Nachfolgenutzung	- eingeschränkt - Bebauung auf Grund der steilen Böschung nicht möglich
Beständigkeit	
Austrocknung	- aufgrund des Funktionsprinzips Austrocknung nicht relevant
Durchwurzelung	- Durchwurzelung möglich - Verringerung / Verhinderung der Durchwurzelung durch ausreichend mächtige Rekultivierungsschicht und eine darauf abgestimmte Vegetation - verringerte Wasserleitfähigkeit bei dichter Durchwurzelung wird durch verstärkten Wasserentzug durch die Pflanzen ausgeglichen
Mechanische Einwirkungen	- Empfindlich gegenüber kleinflächigen Auflasten (Kornzertrümmerung)
Langzeitverhalten / Alterung	- Bei Erhaltung der Filterstabilität sind keine Alterungserscheinungen zu erwarten - problematisch könnte Verockerung der Kapillarschicht werden, hierzu liegen derzeit kaum Auswertungen vor
Witterung	- witterungsunempfindlich, ausreichende Überdeckung notwendig
Systemsicherheit	
Redundanz	- Nicht vorhanden (einfaches System)
Kontrollierbarkeit	- Nur durch zusätzliche Kontrolleinrichtungen
Reparierbarkeit	- Nach Freilegung grundsätzlich möglich, aber Anbindung von Ersatzschichten wegen der hohen Anforderungen an eng gestufte Materialien schwierig
Schwachstellen	- Ausbildung einer ebenen Fläche zwischen Kapillarschicht und -block (entscheidend für Funktionsweise)
Herstellbarkeit	
Bautechnische Ausführung	- Trennschicht zwischen Kapillarschicht und -block muss möglichst eben hergestellt werden, die Kapillarschicht ist deshalb vor Kopf in ausreichender Mächtigkeit vom Böschungsfuß her einzubauen

Anforderungen an Baustoffe	- Beide Schichten: sehr gleichförmige Materialien mit sehr geringen Ton-, Schluff- und Carbonatgehalten - Kapillarschicht: enggestufte Sande bzw. Kiese - Kapillarkblock: enggestufter Kies, größtmöglicher Porensprung zur Kapillarschicht bei Einhaltung der Filterstabilität notwendig,
Witterungsabhängigkeit (Einbau)	- Relativ unabhängig, problematisch im Bauprozess sind Starkregenereignisse und Sandflug bei Sturm
Qualitätssicherung	- Abnahme des Materials entsprechend der vorgeschriebenen Sieblinie, Aufbau der Kapillarschicht nur auf ebenem Kapillarkblock - Überwachungsprogramm nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, TÜV-Zertifizierung nach DIN ISO 9001
Materialverfügbarkeit	- Kapillarschicht: kaum problematisch - Kapillarkblock: teilweise schwierig, meist Aufbereitung erforderlich (kann zum Ausschlusskriterium werden)

Gleichwertigkeit

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung	- Nicht möglich
Eignungsnachweis	- im Einzelfall möglich

Kosten

- Gesamtkosten (mit Einbau): 100 - 120 DM/m²
- Einzelkosten: s. Kostenübersicht im Anhang 1

Referenzprojekte

Kapillarsperre:

- Deponie "Am Giebelsbach", Landkreis Marburg-Biedenkopf, DK I, Gleichwertigkeitsnachweis vom DIBt und zuständigem RP positiv entschieden (v.d.HUDE & HOPPE, 1997)
- Altablagerung "Am Stempel", Landkreis Marburg-Biedenkopf (v. D. HUDE; JELINEK & KÄMPF 1994)
- Deponie Rheinfelden

mineralische Dichtung über Kapillarsperre:

- Deponie Monte Scherbelino (Frankfurt/Main), Probefelder (v. D. HUDE, KÄMPF & MONTENEGRO, 1995)
- Deponie Karlsruhe-West, max. Oberflächenneigung 1:2,1 (SCHWARZMÜLLER & ROTH, 1997)

Kapillarsperre über KDB:

- Deponie Penig, LKr Mittweida (Modellstandortvorhaben

Kapillarsperre)

KDB über Kapillarsperre:

- Deponie "Breinermoor", Niedersachsen/Ostfriesland
(V.D.HUDE & MÖCKEL, 1997)

2.4.4. Bentonitmatten

In den letzten Jahren sind Bentonitmatten (auch als geosynthetische Tondichtungsbahnen, GTD bezeichnet), zu Produkten entwickelt worden, die als Abdichtungselement z. T. als Stand der Technik anerkannt werden. Für die Oberflächenabdichtung von Deponien ist nach TA Siedlungsabfall ein Ersatz der Regelabdichtung mit einem gleichwertigen System möglich. Im Rahmen des 1998 eingestellten Zulassungsverfahrens für Bentonitmatten beim DIBt Berlin (s. Kap. 2.3) wurden für Produkte mehrerer Hersteller Zulassungen für den Einsatz der Bentonitmatten in zweilagiger Ausführung in Deponien der DK I erteilt. Diese Zulassungen sind im Hinblick auf die hier definierten Anforderungen und Maßnahmen zur Qualitätssicherung weiterhin verwendbar und können als eine Basis für die Beurteilung ggf. verbesserter, neuer Produkte benutzt werden. Allerdings stellt diese Deponieklasse nicht den Schwerpunkt der Probleme bei Abfallablagerungen dar. Für andere Einsatzfelder sind die entsprechenden Eignungsnachweise zu erbringen.

Der Arbeitskreis 5.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) plant im Laufe des Jahres 2000 die "Empfehlungen zum Einsatz von geosynthetischen Tondichtungsbahnen bei Oberflächenabdichtungssystemen" zu veröffentlichen.

In Abb. 4 ist der prinzipielle Aufbau eines Oberflächenabdichtungssystems mit Bentonitmatten dargestellt.

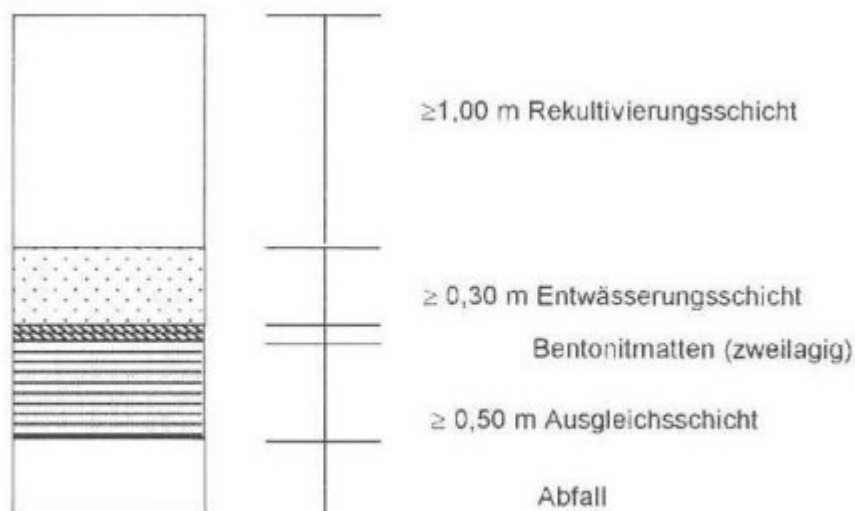


Abb. 4: Aufbau des Systems mit Bentonitmatten (DK I)

Bentonitmatten bestehen aus in textilen Trägerlagen flächenhaft eingekapseltem Ton. Aufgrund der sehr geringen Mattenstärke von ca. 7 mm im trockenen Zustand werden hohe Anforderungen an das Ausgangsmaterial Bentonit gestellt, da dieses maßgeblich die Dichtungseigenschaften der GTD bestimmt. Bentonit ist ein Ton mit einem sehr hohen Anteil des Tonminerals Montmorillonit (ca. 70 - 90%). Dieses Dreischichttonmineral aus der Gruppe der Smectite ist auf Grund seiner Schichtstruktur in der Lage, große Mengen an Wasser zwischen den Mineralschichten einzulagern (Wasseraufnahme bis 300 % bei Calcium-Bentoniten und bis 800 % bei Natrium-Bentoniten) und dabei stark zu quellen (JASMUND & LAGALY, 1993).

Um eine Verlagerung des feinen Tonmehls zu verhindern, wird Bentonit in Verbindung mit Geotextilien zu geosynthetischen Tondichtungsbahnen verarbeitet. Als Produkte werden vernadelte Bentonitmatten (der Bentonit befindet sich zwischen zwei vollflächig miteinander vernadelten Geotextilien) oder vernähte Bentonitmatten (der Bentonit befindet sich zwischen zwei punktuell miteinander vernähten Geotextilien) angeboten.

Bei der Vernadelung werden die Geotextilschichten mittels Fasern aus PEHD oder PP durch die Bentonitschicht hindurch miteinander verankert. Die dadurch entstehenden Faserbrücken sind in der Lage, Schubkräfte auch langfristig aufzunehmen und zu übertragen. Das Faserlabyrinth schützt darüber hinaus die Bentonitaggregate vor Erosion und Verlagerung.

Bei vernähten Bentonitmatten wird durch ein Stützvlies der Abstand zwischen den beiden Geotextilschichten gewahrt und das Bentonitmehl vor Verdrückungen geschützt. Deck- und Trägervlies werden durch im geringem Abstand geführte Nähte miteinander verbunden. Die Übertragung der Schubkräfte erfolgt über das Material der Nähte.

Dichtigkeit

Bentonitmatten weisen einen Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich von 10^{-10} m/s bis 10^{-11} m/s auf. Im Entwurf der o.a. Empfehlung des Arbeitskreises der DGGT zu Bentonitmatten wird zur Charakterisierung der Dichtigkeit der Kennwert Permittivität (1/s) als Quotient aus Durchlässigkeit und Dicke der Bentonitmatte, eingeführt. Übliche Laborwerte liegen unter $5 \cdot 10^{-9}$ 1/s und überschreiten diesen Wert auch nach mehrfachen Frost-Tau oder Trocken-Naß-Zyklen nicht.

Im nassen Zustand können Bentonitmatten als gasdicht angesehen werden. Entscheidend für die Beurteilung eines Produktes ist die Systemdichtigkeit unter Berücksichtigung

- lokaler Einbaueinflüsse,
- der Dichtigkeit im Überlappungsbereich,
- von Verformungen und
- des Einflusses von Ionenaustauschprozessen (Austausch von Natrium gegen Calcium).

Standortanforderungen

Die Bentonitschicht weist eine verhältnismäßig geringe Scherfestigkeit auf. Aus diesem Grund konnten sich die verklebten Bentonitmatten auch am Markt nicht durchsetzen. Diese Nachteile wurden

mit den vollflächig vernadelten bzw. vernähten Bentonitmatten beseitigt. Die bei der Vernadelung / Vernähung zwischen den Geotextilschichten erzeugten, sehr zahlreichen Faserbrücken bilden einen gleichmäßigen und richtungsunabhängigen Scherverbund. Lokal konzentrierte Scherspannungen werden durch die vollflächige Verbindung vermieden.

Zahlreiche Untersuchungen und Berechnungen belegen, dass die Bentonitmatten mit der vom Hersteller garantierten Verbundfestigkeit eine langfristig sichere Übertragung der auftretenden Schubkräfte gewährleisten. Ergebnisse von Untersuchungen zur Standsicherheit von Oberflächenabdichtungssystemen mit Bentonitmatten werden u. a. bei ALEXIEW, BERKHOUT & KIRSCHNER (1994) aufgeführt. Danach sind Böschungen mit einer Neigung von 1:3 bei der Kombination Bentonitmatte-KDB standsicher. Großversuche zur inneren Scherfestigkeit von verschiedenen Bentonitmatten, teilweise auch in Verbindung mit KDB, wurden in Cincinnati durchgeführt (KOERNER et al., 1996). Bei diesen Versuchen wurden Böschungsneigungen von 1:3 und 1:2 realisiert.

Durch das bei der Vernadelung bzw. Vernähung entstehende Faserlabyrinth und den darin fixierten Bentonit weisen geosynthetische Tondichtungsbahnen eine sehr homogene Verformbarkeit auf, ohne dass dabei die Dichtungseigenschaften der Matten beeinflusst werden. Untersuchungen belegen, dass bei einer Flächendehnung der Matten von bis zu 20% die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich von 10^{-11} m/s liegen (HEERTEN, 1995).

Durch die geringe Stärke der Bentonitmatten (im trockenen Zustand ca. 7 mm) ist der Platzbedarf sehr gering. Da der Einbau mit relativ leichtem Gerät und wenig Überfahrten erfolgt und Dehnungen bis 10 % ohne Qualitätsverlust aufgenommen werden, sind die Anforderungen an die Tragfähigkeit des Untergrundes geringer als beispielsweise bei der Kombinationsabdichtung. An die Ausgleichsschicht sind jedoch besondere Forderungen zum Schutz der Bentonitmatten vor Beschädigung zu stellen (weitgestuftes Sand-Kies-Gemisch mit Größtkorn 20 mm, Absandung der Oberfläche der Ausgleichsschicht).

Bei Folgenutzungen ist die Tragfähigkeit des gesamten Systems zu berücksichtigen, es ist auf geringe Flächenlasten und Auflastunterschiede zu achten. Eine Bebauung sollte wegen möglicher Setzungsvorgänge und einer eventuellen Beschädigung der Dichtung durch die Installation von Ver- und Entsorgungstrassen vermieden werden. Eine Bepflanzung ist unter Berücksichtigung einer ausreichend mächtigen Rekultivierungsschicht möglich. Dabei ist zu beachten, dass Bentonitmatten generell keine Wurzelsperre darstellen. Es wird deshalb empfohlen, die Rekultivierungsschicht stärker als 1 m zu wählen.

Beständigkeit, Systemsicherheit

Bentonitmatten können unter bestimmten Bedingungen austrocknen und Risse bilden. Entscheidend ist bei gegebenen klimatischen Bedingungen die ausreichende Dimensionierung der Rekultivierungsschicht. Mit einer Austrocknung der Bentonitmatten muss auch bei einer Abdeckung mit der geforderten 1,0 m dicken Rekultivierungsschicht in extremen Klimasituationen gerechnet werden.

1994 wurden auf der Deponie Hamburg-Georgswerder von der Universität Hamburg betreute Testflächen für Bentonitmatten angelegt. Auf diesen Testfeldern wurden die Produkte extremen Bedingungen unterworfen (nur insgesamt 45 cm starke Abdeckung über den Matten in Verbindung mit äußerst geringen Niederschlägen im Beobachtungszeitraum). Die Ergebnisse zeigten, dass sich unter dem Einfluß der sehr trockenen Witterung im Sommer 1995 Austrocknungsrisse in der Bentonitschicht gebildet hatten, die sich nach Wiederbefeuchtung nicht wieder vollständig schlossen und es dadurch zu Sickerwasserdurchbrüchen kam. Um die genaueren Ursachen feststellen zu können, wurden ein umfangreiches Untersuchungsprogramm im Auftrag der Hersteller durchgeführt.

Die Auswertung dieses Programms zeigt, dass auf eine wasserspeichernde, mindestens 1 m mächtige Rekultivierungsschicht, ein speicherfähiges Auflager sowie eine kapillarbrechende Dränschicht über der Bentonitmatte nicht verzichtet werden kann. Die Dichtigkeit der Bentonitmatte kann dauerhaft nur gewährleistet werden, wenn eine trocknungsbedingte Rissbildung in der Bentonitschicht ausgeschlossen wird.

Ionenaustauschprozesse führen bei den bisher überwiegend eingesetzten Natriumbentoniten zu einer Umwandlung in Calciumbentonite. Dieser Ionenaustausch ist unter natürlichen Bedingungen normal und nicht aufhaltbar. Dies führt zu:

- geringerem Quell- bzw. Wasseraufnahmevermögen bei zunehmendem Austausch von Na-Ionen gegen Ca-Ionen,
- bei Verringerung des Wassergehaltes Schrumpfen des Bentonitvolumens,
- möglicher Rissbildung bei weiterem Wasserentzug.

Naheliegender ist deshalb, anstelle von Na-Bentonit die weniger quellfähigen Ca-Bentonite einzusetzen. Auch mit Ca-Bentoniten sind bei vollständiger Wasseraufnahme Durchlässigkeitsbeiwerte $<10^{-11}$ m/s zu erreichen. Sie weisen eine reduzierte Schrumpfnegung infolge der geringeren Quellfähigkeit auf. Des Weiteren erfolgt bei diesen Matten keine Veränderung des Quellverhaltens im Einbauzustand. Der Vorteil beim Einsatz von Ca-Bentoniten wäre somit eine deutlich geringere Volumenveränderung und damit eine Reduzierung der Gefahr von Rissbildungen. Durch ein erhöhtes Bentonitgewicht von 9-10 kg/m² ergibt sich ein höheres Puffervermögen gegenüber Feuchtigkeitsschwankungen. Detaillierte Untersuchungen hierzu wurden von ALEXIEW (1999) und FLÜGGE (1999) dargestellt.

Die Geotextilschichten der Bentonitmatten stellen für Pflanzenwurzeln generell kein Hindernis dar, die dichte Bentonitschicht ist dagegen schwer durchwurzelbar. Weist letztere aber infolge von Austrocknungsprozessen Risse auf, ist eine schnelle Durchwurzelung zu erwarten. Durch einen geeigneten Aufbau der Rekultivierungsschicht (s. Kap. 3.2.3) kann diese Gefahr minimiert werden.

Um beim Verlegen der Bentonitmatten eine Perforation der Matten aufgrund der geringen Dicke zu verhindern, wurden von den Herstellern Vorschriften entwickelt, deren Einhaltung Schäden beim Einbau verhindern. Generell ist ein direktes Befahren der ausgelegten GTD-Bahnen nicht zulässig. Der Einbau von Schüttmaterial soll nur über Kopf erfolgen.

Eine Systemsicherheit in Form einer langzeitigen Dichtigkeit und Standsicherheit der Oberflächenabdichtung kann nur erreicht werden, wenn projektspezifische Randbedingungen wie die

Standortfaktoren, die Eigenschaften der Ablagerungen sowie vorgesehene Materialien, die Geometrie der Deponie, die Folgenutzung u.a. aufeinander abgestimmt werden.

Herstellbarkeit

Die Herstellung der Bentonitmatten erfolgt i. d. R. fabrikmäßig unter Einhaltung eines Qualitätssicherungsprogramms mit Eigen- und Fremdüberwachung. Die Rohstoffe für die Herstellung sind derzeit problemlos verfügbar und unterliegen im Rahmen des Qualitätsmanagements einer standardisierten Eingangskontrolle. Dadurch werden in ihren Eigenschaften genau bekannte und überprüfte Produkte zum Einbau zur Verfügung gestellt.

Die Verlegung der Bentonitmatten hat nur nach den Verlegeanleitungen der Hersteller auf einem ebenen, trockenen Planum mit geeigneter Technik in faltenfreier Einbauweise zu erfolgen. Besonderes Augenmerk ist auf die Herstellung von Überlappungen und von Anschlüssen an Bauteile und Durchdringungen zu richten. Hierzu sind vom Hersteller detaillierte Angaben zu machen. Die erstellten Dichtungsflächen sind arbeitstäglich abzunehmen und zum Schutz vor Witterungseinflüssen nach der Abnahme sofort mit Boden zu überdecken. Gequollene Bentonitmatten, die einen vom Hersteller vorgeschriebenen Wassergehalt überschreiten, sind vor der Überdeckung auszutauschen.

Die Verlegung der Bentonitmatten muss bei trockener, frostfreier Witterung erfolgen. Freiliegende Bentonitmatten sind bei unsicherer Witterung oder längeren Arbeitsunterbrechungen mit Folien vor Nässe zu schützen. Das gilt auch für Anschlüsse an Bauwerke und Rohrdurchdringungen.

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für Bentonitmatten:

Dichtigkeit	
Gas	- dicht
Wasser	- dicht
Standortanforderungen	
Standicherheit	- begrenzt durch innere Scherfestigkeit, durch Alterung der Geotextilien erhöhte Sicherheitsbeiwerte bei Auslegung notwendig
Setzungsempfindlichkeit	- langfristige mehraxiale Dehnung von max. 10 % ohne Schäden aufnehmbar
Platzbedarf	- gering (Stärke der Bentonitmatten im ungequollen Zustand ca. 7 mm)
Nachfolgenutzung	- eingeschränkt - nur bei geringen Flächenlasten und Auflastunterschieden, bei baulichen Nutzungen müssen Setzungen abgeklungen sein, Schutz vor Durchdringung der Dichtung durch Versorgungsstraßen
Beständigkeit	

Austrocknung	- bei Einhaltung der Kriterien der allgemeinen bauaufsichtlicher Zulassung Austrocknung nahezu ausgeschlossen
Durchwurzelung	- Möglich
Mechanische Einwirkungen	- Empfindlich gegen Durchdringung von groben Bestandteilen anderer Schichten
Langzeitverhalten / Alterung	- Natriumbentonite wandeln sich innerhalb relativ kurzer Zeit in Calciumbentonite um, die ein geringeres Quellvermögen aufweisen, naheliegend ist es deshalb verstärkt auch Calciumbentonit einzusetzen
Witterung	- Nach Einbau relativ witterungsunabhängig durch Überdeckung mit weiteren Schichten

Systemsicherheit

Redundanz	- Nicht vorhanden
Kontrollierbarkeit	- Nur durch zusätzliche Kontrolleinrichtungen
Reparierbarkeit	- Nach Aufgrabungen möglich, entsprechend der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen
Schwachstellen	- Durchdringungen

Herstellbarkeit

Bautechnische Ausführung	- Herstellung der Matten nach standardisierten Verfahren - Vorgaben und Schulungen für den Einbau durch den Hersteller
Anforderungen an die Baustoffe	- Verwendung von Bentoniten mit vorgeschriebenem Mindestgehalt an Montmorillonit - bei den Geotextilien Prüfung auf Alterungsbeständigkeit und Beständigkeit gegenüber chemischer Belastung
Witterungsabhängigkeit (Einbau)	- stark witterungsabhängig
Qualitätssicherung	- Überwachungsprogramm nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, Eigen- und Fremdüberwachung sind nachzuweisen
Materialverfügbarkeit	- mehrere Anbieter von Bentonitmatten vorhanden

Gleichwertigkeit

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung	In Anlehnung an die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
Eignungsnachweis	- Für abweichende Vorhaben sind projektbezogen Eignungsnachweise zu erbringen

Kosten	- Gesamtkosten (mit Einbau): 80 – 100 DM/m ² (Na-Bentonitmatte, zweilagig verlegt) - Einzelkosten: s. Kostenübersicht im Anhang 1
Referenzprojekte	- Deponie Nadelwitz, Kreis Bautzen (temporäre Abdeckung) - Deponie "Ansprung-Olbernhau", LKr Mittlerer Erzgebirgskreis - Deponie Kohlwesa, Kreis Bautzen - Deponie "Oberfrauendorf," Gemeinde Reinhardtsgrimma Weißeritzkreis, (Böschung 1:2,5)

2.4.5. Asphaltbetonabdichtungen

Asphaltbeton ist ein Gemisch aus Splitten oder Kiesen verschiedener Körnungen, Sanden, Füllern und Bitumen, dessen Zusammensetzung an die örtlichen Gegebenheiten und Anforderungen angepasst werden kann. Dichtungen aus Asphaltbeton haben sich im Wasserbau (Pumpspeicherbecken, Kanäle) als zuverlässige und langzeitbeständige Systeme bewährt. Auch im Bereich der Basisabdichtung von Deponien und Zwischenlagern werden Asphaltbetonabdichtungen seit den siebziger Jahren errichtet. Seit dem 23.07.1996 gibt es eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Nr. Z-67.11-1) für die Errichtung von Basisabdichtungen aus Asphaltbeton (DIBt, 1996). In Abb. 5 ist der Aufbau der Asphaltbetonabdichtung dargestellt.

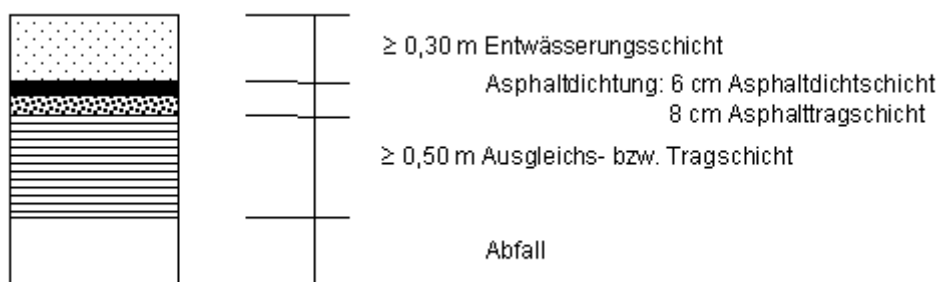


Abb. 5: Aufbau der Asphaltbetonabdichtung

Für den Einsatz von Asphaltbeton bei Oberflächenabdichtungen sprechen folgende günstige Eigenschaften:

- Gas- und Wasserdichtigkeit
- Robustheit
- Unempfindlichkeit gegenüber Wassergehaltsschwankungen.

Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Oberflächendichtungen in Asphaltbauweise wird nach Auskunft des Deutschen Asphaltinstitutes Bonn nicht angestrebt. Aus diesem Grund sind objektbezogene Eignungsnachweise für geplante Asphaltbeton-Oberflächenabdichtungen zu erbringen.

Dichtigkeit

Asphaltbetonabdichtungen in qualitätsgerechter Ausführung (Hohlraumgehalt ≤ 3 Vol%) sind gas- und wasserdicht. Das belegen auch Untersuchungen an Bohrkernen aus Basisabdichtungen, die über einen längeren Zeitraum den Bedingungen einer Deponie ausgesetzt waren. Es konnte auch nach 60-tägiger Versuchsdauer kein Wasserdurchfluss festgestellt werden (STOCKMEYER & MÜLLER, 1997).

Standortanforderungen

Auf Grund der günstigen Scherparameter lassen sich mit Asphaltbeton steile Böschungen ausführen. Bei geeignetem Untergrund sind Neigungsverhältnisse bis 1:2 realisierbar, als Grenze aus Sicht der Bauausführung und Standsicherheit werden Neigungen von 1:1,5 angesehen (DvwK, 1996).

Nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für die Errichtung von Basisabdichtungen aus Asphaltbeton dürfen mit dem zugelassenen Deponieasphalt Böschungen bis 1:2,5 errichtet werden (DIBt, 1996). Allerdings ist hinsichtlich der Standsicherheit das gesamte geplante Dichtungssystem zu überprüfen. Bei Neigungen über 1:4 ist es erforderlich, den Nachweis über die Herstellbarkeit des Gesamtsystems an einem Probefeld zu erbringen.

Asphalt weist von temperaturabhängige viskoelastische Eigenschaften auf, die bei der Erbringung von Standsicherheitsnachweisen zu beachten sind. Bei Überdeckungen mit weiteren Schichten im Oberflächenabdichtungssystem ist nur der Temperatureinfluß des Deponiekörpers zu beachten. Stellt die Asphaltbetonabdichtung aber die oberste Schicht dar, sind die durch Sonneneinstrahlung erhöhten Temperaturen in die Planung einzubeziehen.

Asphaltbetonabdichtungen sind setzungsempfindlich. So sind Ablagerungen hinsichtlich ihres Gasbildungspotentials und den daraus resultierenden Setzungen besonders sorgfältig zu beachten. Verschiedene Untersuchungen (STEFFEN, 1995) zeigten jedoch, dass Setzungen von 1:7 bis 1:5 (1 m Setzung bei Muldendurchmessern zwischen 7 und 5 m) ohne negative Auswirkungen auf die Dichtigkeit aufgenommen werden können. Diese Größenordnungen stellen auch für Kombinationsabdichtungen und rein mineralische Abdichtungen die Grenze der Belastbarkeit dar. Aus Sicherheitsgründen sollten aber keine Setzungen von mehr als 1:10 aufgenommen werden müssen. Setzungsmulden mit sehr kleinen Krümmungsradien führen zu besonders hohen Beanspruchungen der Dichtung. Solche Setzungen haben ihren Ursprung immer in geringen Tiefen unter der Dichtungsschicht. Werden in der obersten Schicht des Deponiekörpers (1 m) Materialien eingebaut, die nur geringe Setzungen aufweisen (z. B. Schlacken, belastetes Bodenmaterial) und eine wenigstens mitteldichte Lagerung durch Verdichtung erreicht, sind solche Belastungen ausgeschlossen (HAAS, 1995). Bei Deponien mit Entgasungsanlagen empfiehlt STEFFEN (1995), die Entgasungsleitungen so tief unter der Dichtung zu verlegen, dass Verformungen soweit abgemildert werden, dass keine Setzungssprünge auftreten, sondern muldenförmige Setzungserscheinungen.

Der Platzbedarf der eigentlichen Asphaltbetonabdichtung ist sehr gering. Entscheidend ist aber der Platzbedarf des gesamten Dichtungssystems inklusive Auflager und möglicher Rekultivierungs- und Dränschichten.

Um die notwendige Verdichtung der Asphaltsschichten (Hohlraumgehalt $\leq 3 \text{ Vol}\%$) zu erreichen, muss das Auflager bestimmte Voraussetzungen hinsichtlich der Tragfähigkeit erfüllen. In der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (DIBt, 1996) wird für die mineralische Tragschicht ein Verformungsmodul von $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ nach DIN 18134 gefordert. Aus diesem Grund wird meist der Einbau einer mineralischen Trag- und Ausgleichsschicht auf dem Ablagerungskörper mit diesen Eigenschaften notwendig. Im von STEFFEN (1995) beschriebenen Beispiel der Deponie Heddernheim, auf der die Setzungen bereits abgeklungen waren, wurde eine 35 cm Schottertragschicht (0/56 mm) eingebaut, die THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT (1994) empfiehlt eine 50 cm starke Ausgleichsschicht bei Asphaltbetonabdichtungen in Verbindung mit Rekultivierungs- und Dränageschichten.

Da Asphaltbetonabdichtungen ohne Schutzschichten errichtet werden können, ist eine Folgenutzung als Park-, Lager- und Gewerbefläche möglich. Hohe Flächenlasten und große Auflastunterschiede sind bei der Nutzung zu vermeiden. Wird o. g. Nutzungsvariante angestrebt, sollte die Dichtung mit einer weiteren Asphaltsschicht versehen werden, die als Verschleißschicht dient. Eine Überdeckung mit Rekultivierungsmaterial ist ebenfalls möglich.

Beständigkeit

Das Problem der Austrocknungsgefahr besteht bei Asphaltbetonabdichtungen auf Grund ihrer Zusammensetzung nicht. Des weiteren ist die Asphaltbetonabdichtung konvektionsdicht bei einem Hohlraumgehalt $\leq 3 \text{ Vol}\%$ und einem Bindemittelgehalt $\geq 5 \text{ Gew}\%$, wobei eine vom Größtkorn abhängige Mindestdicke der Asphaltsschichten einzuhalten ist (Merkblatt des DvWK, Nr. 237/1996, (1996).

Das Alterungsverhalten wurde mehrfach an Proben aus Deponiebasisabdichtungen und an Proben aus dem Asphaltwasserbau untersucht, dabei wurde stets festgestellt, dass sich das Material in seiner Dichtungseigenschaften nicht verändert hatte (HAAS, 1994; HENKEN-MELLIES & KOWALOW, 1997). Die Alterungsbeständigkeit von Asphaltbetonabdichtungen in Oberflächenabdichtungen wird weiterhin in HAAS (1994) dargestellt. Hierbei zeigten 50 Jahre alte Proben noch hohe Dichtigkeiten.

Oxidativ bedingte Alterungsprozesse in der Asphaltsschicht können bei Einhaltung des geforderten niedrigen Hohlraumgehaltes ausgeschlossen werden. Bei der Nutzung als Park-, Lager- und Gewerbefläche ist zum Schutz vor einer Beeinträchtigung durch UV-Strahlung eine zusätzliche Oberflächenversiegelung vorzunehmen. Dafür genügt die o. g. Verschleißschicht.

Asphaltbetonabdichtungen sind witterungsbeständig und erosionsfest. Sie können auf Grund ihrer viskoelastischen Eigenschaften Längenänderungen, die durch Temperaturschwankungen bedingt sind, sehr gut aufnehmen, ohne dass die Dichtungseigenschaften beeinträchtigt werden.

Systemsicherheit

Im Bereich der Basisabdichtung entspricht die Asphaltbetonabdichtung in Verbindung mit einer mineralischen Dichtung dem anerkannten Stand der Technik. Im Bereich der Oberflächenabdichtung besteht noch Forschungsbedarf in Bezug auf das Setzungsverhalten und auf die Herstellung von Verbindungen mit Bauwerken.

Bei ordnungsgemäßer Ausführung sind Asphaltbetonabdichtungen als dicht und sehr beständig gegenüber Alterungen anzusehen. Durch Variation der Zusammensetzung können Asphaltbetonabdichtungen sehr gut an spezielle Einsatzanforderungen angepaßt werden. Sie erfüllen ihre Dichtungsfunktion sowohl bei hoher Stabilität als auch bei gegebenenfalls gewünschter hoher Verformbarkeit. Schäden an der Dichtung können nach Aufgrabung grundsätzlich repariert werden.

Mit Asphaltbeton können auch redundante Dichtungen hergestellt werden. Dafür ist folgender Schichtaufbau notwendig:

- Auflager
- Asphalttragschicht
- Asphaltlichtschicht
- Dränasphaltschicht
- Asphaltlichtschicht

Durch diesen Aufbau können Asphaltbetonabdichtungen auch kontrollierbar gestaltet werden.

Herstellbarkeit

Für den Einsatz als Dichtungsmaterial muss der verwendete Asphaltbeton bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen. Als Orientierung für der Materialqualität können die Werte der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (DIBt, 1996) dienen. Da bei der Ausführung von Oberflächenabdichtungen in Asphaltbauweise ohnehin projektbezogene Eignungsnachweise erbracht werden müssen, sind die dort formulierten Forderungen zu beachten. Für die Qualitätssicherung beim Einbau sind die Hinweise des Dvwk (1996) zu beachten:

- Das Planum ist eben, tragfähig und entsprechend des geplanten Profils herzustellen.
- Abweichungen des Planums von der Sollhöhe dürfen max. ± 20 mm betragen.
- Asphaltlichtschichten dürfen nur auf ein trockenes und frostfreies Planum ausgebracht werden.
- Die Asphaltlichtung sollte aus Asphalttragschicht und -lichtungsschicht aufgebaut werden (Abweichungen sind entsprechend des Eignungsnachweises möglich).
- Asphaltlichtschichten sind mehrlagig einzubauen, die jeweils untere Lage muss trocken und staub-, schnee- und eisfrei sein, um eine flächenhafte Verbindung zwischen den Lagen zu gewährleisten.

Die Lufttemperatur muss beim Einbau der Lichtschichten min. $+3^{\circ}\text{C}$ betragen.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert die Herstellung der Nähte zwischen den Fertigungsbahnen, da Fugen oder Dehnungsrisse infolge von Relativbewegungen oder Zugspannungen zu hydraulisch wirksamen Haarrissen führen können. Nach Möglichkeit ist ein Einbau "heiß an heiß" anzustreben. Ist dies nicht möglich, sind die Vorschriften des Dvwk (1996) für einen Einbau "heiß an kalt" zu beachten. Um eine gute Verbindung der Bahnen zu gewährleisten, sind die Ränder der Bahnen in

einem Winkel von 70° anzuschrägen. Durchdringungsbauwerke sind bei Oberflächenabdichtungen mit Asphalt grundsätzlich zu vermeiden. Ansonsten ist durch konstruktive Maßnahmen sicherzustellen, dass sich die Dichtung bei stattfindenden Setzungen nicht am Bauwerk "aufhängen" kann. Für die Ausführung von Rohrdurchdringungen sind im Merkblatt des DvWK (1996) Beispiellösungen angeführt.

Werden auf die Asphaltdichtung noch Drainage- und Rekultivierungsschichten aufgebracht, sollte die unterste Lage Dränkies aus Material mit geringen Korndurchmessern aufgebaut werden, da sich einzelne Körner bedingt durch die Auflast in die Asphaltschicht einpressen können.

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für Asphaltbetonabdichtungen:

Dichtigkeit	
Gas	- dicht
Wasser	- dicht
Standortanforderungen	
Standicherheit	- unproblematisch - Neigungen bis 1:2,5 gelten als sicher ohne weiteren Nachweis - bei geeigneten Untergrund standsicher bis 1:2,0
Setzungsempfindlichkeit	- mittel - problematisch sind Setzungssprünge und Durchdringungsbauwerke bzw. schnellablaufende Scher- und Dehnungsbeanspruchungen
Platzbedarf	- gering für eigentliche Dichtschicht - (in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit des Untergrundes muss aber ein ausreichendes Auflager erstellt werden)
Nachfolgenutzung	- Eingeschränkt
	- nur bei geringen Flächenlasten und Auflastunterschieden
Beständigkeit	
Austrocknung	- Keine Austrocknung
Durchwurzelung	- Keine Durchwurzelung
mechanische Einwirkungen	- Gefahr des Durchdrückens von groben Bestandteilen anderer Schichten möglich, direkt angrenzende Lagen der anderen Schichten sollten relativ feinkörnig sein
Langzeitverhalten / Alterung	- sehr alterungsbeständig, auch ohne weitere Schutzschichten

Witterung	- Witterungsbeständig
Systemsicherheit	
Redundanz	- Nicht vorhanden
Kontrollierbarkeit	- Visuell, wenn keine Rekultivierungsschicht aufgebracht wird
Reparierbarkeit	- Grundsätzlich möglich, relativ einfach
Schwachstellen	- Setzungsempfindlichkeit
Herstellbarkeit	
Bautechnische Ausführung	- Aufbau aus Asphalttrag- und -dichtungsschicht in mehreren Lagen, Einzelbahnen möglichst heiß an heiß einbauen oder DvWK-Vorschriften beachten (1996)
Anforderungen an Baustoffe	- Orientierung an den Werten der DIBt - Zulassung für die Basisabdichtung (1996), Verwendung von "Deponieasphalt"
Witterungsabhängigkeit (Einbau)	- Frostfreies Auflager, saubere, plane und trockene Oberflächen der unteren Schichten, Lufttemperaturen von min. + 3 °C
Qualitätssicherung	- Eigen- und Fremdüberwachung auf der Grundlage des Merkblattes "Qualitätssicherung bei Asphaltabdichtungen für Deponien" (DIBt, 1996)
Materialverfügbarkeit	- Höherer Aufwand zur Beschaffung des Materials
Gleichwertigkeit	
Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung	- nur für Basisabdichtung vorhanden - (in Kombination mit einer mineralischen Dichtungsschicht für Deponieklasse II)
Kosten	- Gesamtkosten (mit Einbau): 110 - 140 DM/m² - Einzelkosten: s. Kostenübersicht im Anhang 1
Referenzprojekte	- Deponie "Weißer Weg", Chemnitz (Planung für Altkörper) - Deponie "Lohe", Wiesenburg, Zwickauer Land (Planung, mit Rekultivierungsschicht) - Inertstoffdeponie Merka-Luttowitz, Kreis Bautzen (Teiloberflächendichtung mit Nachnutzung als Lagerplatz) - Bauschuttdeponie Dreistern, Kreis Bautzen (Oberflächendichtung auf 20.000 m² mit Nachnutzung als Lagerplatz)

- Deponie "Heddernheim", Frankfurt (STEFFEN, 1995)

2.5. Abdeckungen

2.5.1. Qualifizierte Abdeckungen

Unter dem Begriff "qualifizierte Abdeckung" wird ein System aus einer ein- oder mehrlagigen Abdeckschicht mit geringerer Durchlässigkeit sowie einer Rekultivierungsschicht mit Vegetationsdecke verstanden, mit dem eine maximale Rückhaltung bzw. Verdunstung des Niederschlages erreicht werden soll (BERGER & SOKOLLEK, 1997). Im Vordergrund steht hier die Rekultivierungsschicht in ihrer Funktion als Wasserhaushaltsschicht und Pflanzenstandort.

Die Sickerwasserminimierung kann durch eine Optimierung von Bodenart, Aufbau und Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht und darauf abgestimmter Vegetation mit hoher Verdunstungsleistung erreicht werden. Dabei sollte eine ausreichende, möglichst über die gesamte Vegetationsperiode gesicherte Versorgung mit Wasser und Nährstoffen gewährleistet sein, die Bodenluft genügend Sauerstoff enthalten und der pH-Wert in einem pflanzenverträglichen Bereich (optimal pH: 5,5 - 7) liegen. Es empfiehlt sich ein mehrlagiger Aufbau, der die natürliche Horizontabfolge nachempfunden. In Abb. 6 ist ein möglicher Aufbau für dieses System dargestellt.

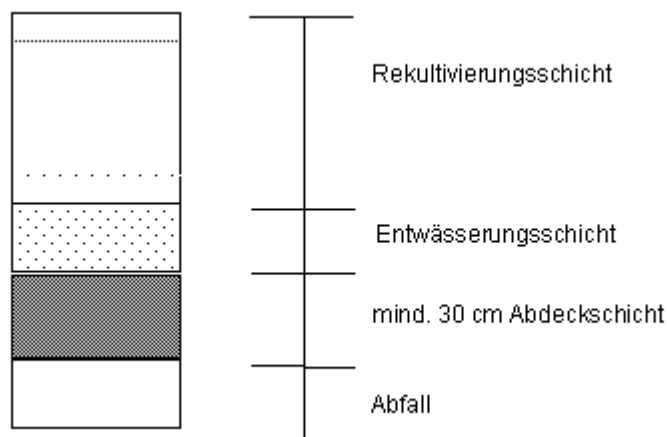


Abb. 6: möglicher Aufbau der qualifizierten Abdeckung

Mindestanforderungen an die Abdeckschicht sind eine Mächtigkeit von 30cm und ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 10^{-7}$ m/s. Grundsätzliche Anforderungen an die Rekultivierungsschicht sind ein Aufbau aus mindestens 2 Schichten (kulturfähiger Unterboden, humose Oberbodenschicht) sowie ein Abstimmen von Bodensubstrat und Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht auf die geplante Vegetation (insbesondere Beachtung der Wurzeltiefe). Besonders bei Verwendung von bindigem schrumpffähigem Material für die Abdeckschicht sollte die Rekultivierungsschicht > 1 m mächtig sein. Zur Verminderung der Durchwurzelung kann eine dritte (unterste) Schicht als sog. Wurzelsperre aus bindigem, sehr steinigem oder sehr sandigem Material mit hoher Lagerungsdichte ($> 1,8 \text{ g/cm}^3$) eingebaut werden.

Beim Einbau der Materialien sollte der Boden möglichst wenig befahren werden, um Verdichtungen zu vermeiden. Optimal ist ein Vorkopfeinbau mit Radladern. Das Material soll nach Möglichkeit aus der näheren Umgebung der Ablagerung gewonnen werden, s. hierzu Kapitel 2.2.2, Punkt Herstellbarkeit.

Wie bereits dargestellt, steht bei diesem System die Rekultivierung im Vordergrund. Dieser Komplex wird umfassend in Kapitel 3 besprochen. Ausgehend von einigen Grundlagen zum Wasserhaushalt sowie der Darstellung der wesentlichen Eigenschaften von Böden werden folgende Empfehlungen zur Rekultivierung gegeben:

- Einbau der Rekultivierungsschicht (Kapitel 3.2.3.2)
 - Mächtigkeit, mehrlagiger Einbau
 - Bodensubstrat
 - stoffliche Zusammensetzung
 - Anforderungen an den Einbau

bzw.

- Auswahl der Vegetation (Kapitel 3.2.3.3).

Das System stellt eine Alternative für Ablagerungen mit geringem Gefährdungspotential dar und ist des weiteren besonders für niederschlagsärmere Regionen (650 - 700 mm Jahresniederschlag) geeignet. In **Anhang 2** ist eine Übersicht über die **Verteilung langjähriger Mittel der Niederschlagsmengen** Sachsens gegeben, die als Orientierung dienen kann.

Welche mittleren und im Extremfall maximalen Versickerungsraten als noch tolerabel angesehen werden können, muss im Einzelfall entschieden werden. Geht man von der Regeldichtung der TA Siedlungsabfall, DK I, ($k_f \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s) aus, so ist eine jährliche Versickerung von reichlich 100 mm zulässig, wenn man einen hydraulischen Gradienten von 1 und eine achtmonatige Versickerungsphase zugrundelegt (BERGER & SOKOLLEK, 1997) ist. Eine Simulation der Versickerungsprozesse ist anhand verschiedener Modelle möglich und empfehlenswert. Die für den Zweck besonders geeigneten Modelle HELP bzw. BOWAHALD werden in Kapitel 3.2.4 bzw. den Anhängen 12 und 13 vorgestellt.

Zusammenfassung der Bewertungskriterien für qualifizierte Abdeckungen:

Dichtigkeit	
Gas	- nicht dicht
Wasser	- Restdurchlässigkeit in Abhängigkeit von Speicherfähigkeit, Verdunstungsleistung des Systems Pflanze-Boden
Standortanforderungen	
Standicherheit	- unproblematisch

	- Orientierung an zu pflanzender Vegetation
Setzungsempfindlichkeit	- gering
Platzbedarf	- hoch, besonders am Rand der Deponie
Nachfolgenutzung	- bei abgeklungenen Setzung keine Beschränkungen, eine Bebauung sollte ohne Keller erfolgen
Beständigkeit	
Austrocknung	- entspricht den Verhältnissen eines natürlichen Pflanzenstandortes gleicher Qualität und Lage
Durchwurzelung	- Möglich und erwünscht
mechanische Einwirkungen	- empfindlich gegen Verdichtungen durch häufiges Überfahren während der Bauphase, besonders bei höheren Wassergehalten
Langzeitverhalten / Alterung	- unproblematisch - Angleichung an die Verhältnisse eines natürlich gewachsenen Bodens
Witterung	- witterungsbeständig - bei lückiger Pflanzendecke erosionsgefährdet
Systemsicherheit	
Redundanz	- Nicht vorhanden
Kontrollierbarkeit	- nur in Verbindung mit weiteren Maßnahmen
Reparierbarkeit	- Grundsätzlich möglich, jedoch kaum notwendig
Schwachstellen	- hoher Massenbedarf
Herstellbarkeit	
Bautechnische Ausführung	- Lagenweiser Einbau von wurzelhemmender Schicht, mineralischem Unterboden und humosem Oberboden mit möglichst rauher Oberfläche zur besseren Verzahnung der Schichten, Vermeidung von Verdichtungen
Anforderungen an die Zulassung von Baustoffen	- Günstige Körnung (sandige Lehme, schluffige Sande) um größtmögliche pflanzenverfügbare Wasserkapazität bei ausreichender Durchlässigkeit zu erreichen
Witterungsabhängigkeit	- witterungsempfindlich - Einbau nur bei abgetrocknetem Boden
Qualitätssicherung	- Orientierung an den DIN zur Bodenbearbeitung
Materialverfügbarkeit	- Hoher Aufwand, wenn nicht ortsverfügbar (begrenzender Faktor)

Gleichwertigkeit	- Nicht vorhanden
Kosten	- s. Kostenübersicht im Anhang 1 (mineralische Dichtung)
Referenzprojekte	- Altablagerung Zeisigberg, OT Schönfeld, LKr Riesa-Großenhain - Altablagerung Wilsdruff, LKr Meißen-Radebeul) - Altablagerung Malschwitz, Kreis Bautzen - Altablagerung Putzkau, Kreis Bautzen

2.5.2. Temporäre Abdeckungen

Gemäß Nr. 11.2.1 Buchst. h TA Siedlungsabfall ist bei Deponien/Altdeponien nach Verfüllung eines Deponieabschnittes ein Oberflächenabdichtungssystem aufzubringen. Wenn große Setzungen zu erwarten sind, kann bis zum Abklingen der Hauptsetzungen eine temporäre Abdeckung aufgebracht werden. Die temporäre Abdeckung soll die Sickerwasserbildung minimieren und eine Deponiegasmigration verhindern. Nach Abklingen der Setzungen ist das endgültige Abdichtungssystem aufzubringen. Hierfür wird ein Zeitraum von ca. 10 Jahren veranschlagt. Weitergehende Bestimmungen (z. B. einzuhaltende Mindest- k_f -Werte, Standsicherheitsparameter) existieren nicht.

Die temporäre Abdeckung umfaßt zeitlich einen großen Teil der Betriebsphase und übernimmt die Sicherungsfunktion in der Zeit der Deponie, in der die höchste Gasproduktion bzw. Sickerwassermenge sowie die stärksten Setzungen und Sackungen stattfinden. Die Gestaltung der temporären Abdeckung sollte sich an leicht verfügbaren Materialien orientieren, die folgende generelle Anforderungen erfüllen:

- Minimierung der Sickerwasserbildung und Steuerung der Wasserzufuhr in Deponiekörper
- Minimierung der Gasmigration
- mechanische Widerstandsfähigkeit bzw. leichte Reparierbarkeit bei aufgetretenen Schäden
- Integrierbarkeit in ein später aufzubringendes Oberflächensicherungssystem
- geringe Kosten.

In Abb. 7 ist ein Beispiel für eine temporäre Abdeckung in Anlehnung an BwK (1998) dargestellt.

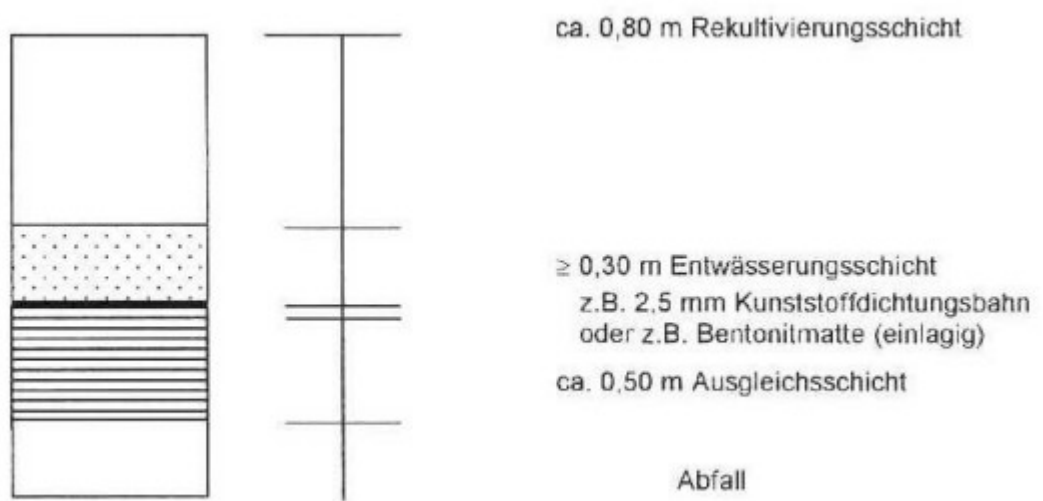


Abb. 7: möglicher Aufbau einer temporären Abdeckung

3. Ausführungen zu anderen Komponenten von Oberflächensicherungssystemen

3.1. Dichtungsaufleger, Gasdrain- und Entwässerungsschicht gemäß TA Abfall Nr. 9.4.1.4 bzw. nach TA Siedlungsabfall Nr. 10.4.1.4

Unter der Dichtungsschicht des Oberflächenabdichtungssystem wird eine Ausgleichsschicht angeordnet, die aus nicht bindigem Material herzustellen ist ($\geq 0,5$ m). Zusätzlich ist bei Bedarf eine Gasdrainschicht ($d \geq 0,3$ m) anzuordnen.

Als Entwässerungsschicht ($d \geq 0,3$ m) sollen gewaschene Mittel- bis Grobkiese eingesetzt werden. Konkrete Material- und Prüfanforderungen, besonders hinsichtlich der chemisch/physikalischen und mechanischen Eigenschaften, sind im Anhang E der TA Abfall festgelegt.

Für die Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien können geotextile Drainschichten ($d = 0,02 \dots 0,04$ m) eingesetzt werden, wenn im Einzelfall nachgewiesen wird, dass Standfestigkeit, Filterstabilität gegenüber angrenzenden Böden und Wasserableitvermögen ausreichend sind. Eine Langzeitbeständigkeit der Geokunststoffe ist nachzuweisen. Allerdings bestehen hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit dieser Materialien noch keine ausreichenden praktischen Erfahrungen. Diesbezüglich werden Bedenken geäußert, die mit einem alterungsbedingten Versagen, insbesondere durch Kolmation und Durchwurzlung, rechnen.

Geotextile Entwässerungsschichten werden als Matten- und Rollenware verlegt.

3.2. Ziel und Funktion der Rekultivierung

3.2.1. Allgemeines

Der Rekultivierung kommt im Zuge der Sicherung von Altablagerungen und Deponien eine entscheidende Bedeutung zu. Sie umfaßt technische und landschaftspflegerische Maßnahmen zur Gestaltung der Oberfläche von Ablagerungen als Voraussetzung für deren Wiedereingliederung in die Landschaft. Die Ausführung der Rekultivierung richtet sich hierbei nach der geplanten Nutzung. In der Regel entzieht sich eine Ablagerung auf absehbare Zeit jeglicher intensiven Nutzung, so dass diese Standorte zum großen Teil extensiv genutzte Flächen darstellen.

Im Hinblick auf die Abdichtung sind folgende Anforderungen an die Rekultivierung zu stellen:

- Reduzierung des Eintrags von Niederschlagswasser (Tiefensickerung),
- Minimierung / Verhinderung der Austrocknung (besonders bei klassischer mineralischer Dichtungskomponente entscheidend),
- Minimierung / Verhinderung der Durchwurzlung,

- Erosionsschutz und
- Frostschutz.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen müssen Bodensubstrat und Vegetation aufeinander abgestimmt sein. Hierbei steht die Funktion der **Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht** im Vordergrund. Durch Speicherung des Wasserangebots sowie ausreichenden Wurzelraum in der Rekultivierungsschicht sind Bedingungen für eine dauerhafte Vegetationsentwicklung zu schaffen, um einen Großteil des Niederschlagswassers über die Pflanzen (Verdunstung) wieder an die Atmosphäre abzugeben. Unter dem Gesichtspunkt, dass die Rekultivierungsschicht die beständigste Komponente im Abdichtungssystem ist, kommt gerade dieser Forderung eine entscheidende Bedeutung zu. In Kapitel 3.2.1 werden einige hierfür notwendige Grundlagen dargestellt. Ausgehend vom Wasserhaushalt von Ablagerungen werden wesentliche Bodeneigenschaften sowie Prozesse der Wasserleitfähigkeit bzw. -speicherung im Boden besprochen.

Empfehlungen zur Rekultivierung, speziell zur Auswahl von Bodensubstrat und Vegetation, werden in **Kapitel 3.2.3** gegeben. In **Kapitel 3.2.4** erfolgt eine Darstellung von **Simulationsmodellen** zur Modellierung des Wasserhaushaltes von Ablagerungen.

3.2.2. Grundlagen

3.2.2.1. Bodeneigenschaften

Bodenart

Böden werden durch Gemische von Mineralkörnern, Gesteinsstückchen und Humuspartikeln unterschiedlicher Korngrößen gebildet. Mit der Bodenart wird die Korngrößenzusammensetzung des mineralischen Bodenmaterials gekennzeichnet. Nach DIN 4220 wird der Boden in die Kornfraktionen des Feinbodens (Durchmesser < 2 mm) und des Grobbodens (Durchmesser > 2 mm) eingeteilt (s. Tabelle 1).

Boden	Fraktion / Bodenart	Kurzzeichen	Durchmesser [mm]
Feinboden	Ton	T	< 0,002
Feinboden	Schluff	U	0,002 – 0,063
Feinboden	Sand	S	0,063 – 2,0
Grobboden	Kies (gerundete Formen)	G	2 - 63
	Grus (eckig-kantige Formen)	Gr	
Grobboden	Steine (rund)	O	> 63
	(kantig)	X	

Tabelle 1: Kornfraktionen des Bodens (nach DIN 4220)

Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf den im Rahmen der Rekultivierung zu betrachtenden Feinboden. Nach dem Vorherrschen einer Fraktion wird in Sand-, Schluff- oder Tonboden unterschieden. Tritt auch eine zweite Fraktion verstärkt auf, so geht auch diese mit in die Bezeichnung ein, z.B. schluffiger Ton. Hinzu kommen Lehme als Sand-Schluff-Tongemenge, die die genannten Fraktionen in nennenswerten Gemengeanteilen enthalten und in ihren Eigenschaften zwischen diesen Bodenarten stehen.

Die Bodenarten werden weiter unterteilt in Bodenartenuntergruppen. Die Kurzzeichen der Bodenartenuntergruppen bestehen aus einem Großbuchstaben für die vorherrschende Fraktion, z.B. S für Sand, einem nachgestellten Kleinbuchstaben, z.B. u für schluffig und einer Kennziffer (2 = schwach, 3 = mittel, 4 = stark) und lautet für einen schwach schluffigen Sand Su2. In **Anhang 3** ist eine komplette Übersicht zu den Bodenarten und den Anteilen der Korngrößenfraktion gegeben.

Die Bodenart beeinflusst die Substratmerkmale Durchwurzelbarkeit, Wasserleitfähigkeit, Speichervermögen für Wasser / Nährstoffe sowie das Sauerstoffangebot im Wurzelraum (Durchlüftung).

Sandböden sind durch einen hohen Anteil an Grobporen (s. Punkt Bodengefüge) charakterisiert, der eine sehr gute Durchlüftung und Wasserleitfähigkeit bedingt. Das Speichervermögen für Wasser und Nährstoffe ist dagegen begrenzt und stellt den limitierenden Faktor für das Pflanzenwachstum dar. Auf Sandböden findet bedingt durch rasche Erwärmbarkeit eine sehr intensive Zersetzung von organischer Substanz statt.

Tonböden weisen zwar das größte Porenvolumen aller Böden auf, dies bezieht sich jedoch zum großen Teil auf Feinporen, die für die Wasserversorgung der Pflanzen und für die Wasserleitfähigkeit keine Rolle spielen. Die für die Durchlüftung wichtigen Grobporen und die für die Wasserversorgung der Pflanzen notwendigen Mittelporen sind nur gering vertreten. Tonböden neigen bei falscher Bearbeitung stark zur Verdichtung und zur Ausbildung von Staunässe. Wegen der geringen Durchlüftung zeigen Tonböden eine schlechte Erwärmbarkeit im Frühjahr.

Lehmböden weisen durch das gleichmäßige Vorhandensein aller Körnungsarten ein optimales Porengefüge auf, so dass es bei normaler Lagerung nicht zu Vernässungen kommt. Die Grobporen sorgen außerdem für eine ausreichende Durchlüftung und für eine normale Erwärmbarkeit im Frühjahr. Die Speichereigenschaft für Wasser und Nährstoffe ist auf Grund der vorhandenen Ton- und Schlufffraktion hoch.

Bodengefüge (Bodenstruktur)

Als Bodengefüge wird die räumliche Anordnung der festen Bodenteilchen bezeichnet. Das Bodengefüge beeinflusst direkt den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt und indirekt die hier vor allem interessierende Bodenentwicklung und Erodierbarkeit. Es ist von mehreren Faktoren, wie Korngrößenzusammensetzung, Gehalt an organischer Substanz, von äußeren Einflüssen (Auflast), Wassergehalt und Wasserbindung abhängig. Unterschieden werden das mit bloßem Auge erkennbare Makrogefüge und das nur mikroskopisch bestimmbare Mikrogefüge. Für praktische Belange reicht die Bestimmung des Makrogefüges, das in die nachfolgend genannten drei Hauptgruppen eingeteilt wird.

Beim **Einzelkorngefüge** sind die Bodenteilchen nicht miteinander verklebt. Eine Verdichtung ist bei diesem Gefügetyp meist nicht möglich bzw. reversibel. Böden mit einem Einzelkorngefüge sind sehr instabil; steile Böschungen zerrieseln leicht, bis sich der natürliche Böschungswinkel einstellt. Dieses Gefüge ist für ton- und eisenoxidarm Sandböden typisch.

Bei **Kohärentgefügen** werden die Bodenteilchen durch Kohäsionskräfte zusammengehalten und bilden eine ungegliederte Masse. Kohärentgefüge kommt vor allem in frisch geschüttetem, noch nicht geschrumpftem Schluff-, Lehm- und Tonböden vor. Kohärent gelagerte Schluffböden sind besonders bei hohem Wassergehalt verdichtungsempfindlich, was zu Staunässe und Sauerstoffmangel im Wurzelraum führen kann. Im Oberboden zerfällt das Kohärentgefüge in Aggregate.

Beim **Aggregatgefüge** sind Teile der Bodenmatrix deutlich von ihrer Umgebung abgesetzt und bilden separate Körperaggregate. Dieser Gefügetyp ist das Ergebnis von Bodenentwicklungsprozessen oder der Bodenbearbeitung. Er kann sowohl aus Einzelkorn- als auch Kohärentgefügen gebildet worden sein. Aggregatgefüge sind sehr stabil und weisen eine gute Durchlüftung sowie Wasserspeicherung auf. Wichtige Gefügestrukturen in ungestörten Böden sind Riss- und Röhrensysteme. Diese Systeme sind für die Durchlüftung der Böden und für eine schnelle Ableitung von Niederschlagswasser in tiefere Bodenschichten wichtig. Fehlt dieses Makroporensystem (z.B. bei Kohärent- oder Einzelkorngefügen), kommt es zu einem verstärkten Oberflächenabfluß (und Erosion) und zu einer unzureichenden Wiederauffüllung der Bodenwasservorräte.

Das Bodengefüge wird entscheidend durch die Kennwerte Lagerungsdichte und Porenvolumen bestimmt.

Als **Lagerungsdichte** wird das Verhältnis der Masse der festen Bodenteilchen zum gesamten Bodenvolumen bezeichnet. Sie stellt einen wichtigen Parameter dar, um bei der Errichtung der Rekultivierungsschicht Verdichtungen zu vermeiden.

Für eine gute Wasserspeicherfähigkeit bzw. Durchlüftung ist neben dem absoluten **Porenvolumen** (Volumenanteil der Poren bezogen auf das gesamte Bodenvolumen) die Porengrößenverteilung entscheidend. Die Grobporen sichern die Entwässerung und Belüftung, Mittel- und Feinporen die Speicherung von Bodenwasser (s. Tabelle 2).

Optimal ist ein Porenvolumen um 50 %, wobei das Verhältnis von Grobporen zur Summe von Mittel- und Feinporen 2:3 betragen sollte (BRAUNS et al., 1996). Diese Werte entsprechen denen der Schluffböden. Der Anteil von Grob-, Mittel- und Feinporen korreliert mit der Körnung der Böden, wobei der Sandgehalt den Grobporenanteil, der Schluffgehalt den Mittelporenanteil und der Tongehalt den Feinporengehalt beeinflusst.

	Sandböden	Schluffböden	Tonböden
Gesamtporenvolumen [%]	46±10	47±9	50±15
Grobporen [%]	30±10	15±10	8±5
Mittelporen [%]	7±5	15±7	10±5
Feinporen [%]	5±3	15±5	35±10

Tabelle 2: Porenvolumen und Anteile der Porenklassen am Bodenvolumen nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992)

Der Mittel- und Grobporenanteil ist in hohem Maße lagerungsabhängig. Die Stabilität der Poren wird vom Gehalt an verklebenden Substanzen (Humus und Calciumkarbonat) gefördert. Die Existenz dieser verklebenden Stoffe ist besonders in den oberen Bodenschichten von Bedeutung, da hier die Bodenteilchen einer besonderen Beanspruchung unterliegen (Befahren, Betreten, Regenschlag). In der Regel führt ein hoher Wassergehalt zu einer Verminderung der Gefügestabilität. Werden Böden in nassem Zustand bearbeitet, kommt es immer zu negativen Gefügeveränderungen mit beträchtliche Einschränkungen der Wasserspeicherung bzw. dem Sauerstoffangebot für Pflanzen.

Gehalt an organischer Substanz (Humus)

In der organischen Substanz des Bodens sind Nährstoffe festgelegt, die beim Abbau dieser langsam freigesetzt und den Pflanzen zur Verfügung gestellt werden. Besonders in Böden mit geringen Tongehalten spielt die organische Substanz als Nährstoffspeicher eine große Rolle. Des weiteren fördert die organische Substanz besonders in tonigen und schluffigen Böden die Bildung und Erhaltung eines grobporigen Aggregatgefüges. Humus besitzt ein hohes Wasserspeichervermögen; er kann etwa das 3- bis 5fache seines Eigengewichtes an Wasser aufnehmen und speichern. So kann auf Sandböden der Wasserhaushalt durch Humusanreicherungen verbessert werden. Hinsichtlich der Verwertung organischer Abfälle sind jedoch entsprechende Einschränkungen zu beachten. In Kapitel 3.2.3 werden Aussagen zum möglichen Einsatz dieser Stoffe zur Bodenverbesserung gegeben.

Bodenacidität (pH-Wert)

Die Acidität (Versauerung) des Bodens wirkt sich auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen, auf die Mobilität toxisch wirkender Aluminium- und Schwermetallionen und über die Stabilität des Bodengefüges auf den Luft- und Wasserhaushalt im Boden aus.

Bei der Versauerung von Böden werden bei Pufferungsreaktionen Silikate aus den Silikatschichten der Tonminerale zerstört; es kommt zu einer Verringerung des Gehaltes an Tonmineralen und damit zu einer Verminderung der Nährstoffspeicherung. Des weiteren werden die für die Gefügestabilität wichtigen Calciumionen ausgewaschen. Die Böden neigen dann verstärkt zum Gefügezerfall und zu Verschlämmung.

3.2.2.2. Bodenwasserhaushalt

Wasserleitfähigkeit

Die Wasserleitfähigkeit des Bodens bestimmt die Geschwindigkeit aller Wasserhaushaltsänderungen im Boden. Es wird zwischen der gesättigten und ungesättigten Wasserleitfähigkeit unterschieden.

Die **gesättigte Wasserleitfähigkeit** (Wasserdurchlässigkeit) nach DARCY setzt die vollständige Wassersättigung aller Poren im Boden voraus. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit k_f kann relativ einfach bestimmt werden und wird daher als Kennwert zur Beurteilung der Dichtungswirkung von Dichtungs- und Rekultivierungsschichten verwandt. Die Wasserleitfähigkeit bestimmt sich nach der Anzahl und Größenverteilung der Poren, der Porenkontinuität sowie dem Gravitationspotential (Tiefensickerung).

Mit abnehmendem Wassergehalt werden zuerst die größeren Poren entleert und die Wasserbewegung auf immer kleinere Poren verlagert. Die jetzt vorhandene **ungesättigte Wasserleitfähigkeit** sinkt gegenüber der gesättigten Leitfähigkeit stark ab. Die unter realen Verhältnissen in Oberflächenabdichtungen vorhandene ungesättigte Wasserleitfähigkeit wird im wesentlichen durch den Wassergehalt und der für den jeweiligen Boden zugehörigen Wasserspannung bestimmt. Unter Wasserspannung (= Saugspannung) wird die Fähigkeit des Bodens verstanden, Wasser an der Bodenmatrix zu halten. Die für die einzelnen Bodenarten Kies, Sand und Schluff charakteristischen Unterschiede sind in Tabelle 3 dargestellt.

Bodenart	Sättigung	Durchlässigkeit bei	
		geringer Saugspannung	hoher Saugspannung (geringer Wassergehalt)
Kies	sehr hoch	sehr gering	sehr gering
Sand	Hoch	hoch	gering
Schluff	Gering	gering	hoch

Tabelle 3: Abhängigkeit der Durchlässigkeit von Bodenart und Wassergehalt

Wasserspeicherfähigkeit und pflanzenverfügbares Wasser

Die Wasserspeicherfähigkeit eines Bodens ist abhängig von

- Bodenart
- Lagerungsdichte
- Humusgehalt.

Sie bestimmen den Anteil an Fein- und Mittelporen im Boden, in denen das Wasser gegen die Schwerkraft im Boden gehalten wird. Für die **Wasserversorgung der Pflanzen** ist der Gehalt an **Mittelporen** entscheidend, da nur dieses Wasser den Pflanzen zur Verfügung steht. Die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser ist bei den verschiedenen Bodenarten unterschiedlich hoch.

Zur Beschreibung der **Menge an pflanzenverfügbarem Wasser** werden die Kenngrößen

- Feldkapazität und
- permanenter Welkepunkt genutzt.

Als **Feldkapazität (FK)** wird die Wassermenge bezeichnet, die ein Boden maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann (AG BODEN, 1994). Durch kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser kann die Feldkapazität bei grundwassernahen Standorten aufgefüllt werden. Die Nachlieferung durch kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser soll hier nicht betrachtet werden, da es sich bei den Rekultivierungsschichten auf Altablagerungen und Deponien meist um vom Grundwasser abgekoppelte Standorte handelt. Das Wasserregime entspricht dem natürlicher Standorte, bei denen der Grundwasserspiegel tiefer als 3 m unter Flur liegt.

Die Feldkapazität wird in pF-Werten angegeben, dem Logarithmus der Saugspannung (= Wasserspannung) im Boden. Konventionell wird der Wassergehalt als Feldkapazität bezeichnet, den der Boden bei einer Saugspannung von $pF=1,8$ (entspricht 60 hPa) aufweist. In diesem Wassergehalt ist auch der Anteil von Bodenwasser mit erfaßt, der durch enge Bindung an die Bodenmatrix für die Pflanzen nicht verfügbar ist. Für praktische Belange ist es aber wichtiger, die Größe des pflanzenverfügbaren Vorrates zu quantifizieren. Der Großteil unserer heimischen Pflanzen ist in der Lage, Wasser aufzunehmen, das mit einer Saugspannung kleiner als $pF=4,2$ (entspricht Saugspannungen bis 1,5 MPa) vom Boden festgehalten wird.

Den Bereich zwischen den pF-Werten 1,8 und 4,2 bezeichnet man als **nutzbare Feldkapazität (nFK)**. Wasser, das mit höheren Saugspannungen ($> 4,2$) festgehalten wird, wird als Totwasser (nicht pflanzenverfügbar) bezeichnet. Der Grenzpunkt zwischen pflanzenverfügbarem Wasser und Totwasser ist als **permanenter Welkepunkt (PWP)** definiert. Weist der Boden Saugspannungen kleiner als $pF=1,8$ auf, versickert das Wasser schneller, als es durch die Pflanzen aufgenommen werden kann. In **Anhang 3** ist für verschiedene Bodenarten die nutzbare Feldkapazität aufgeführt. In Abb. 8 sind die Beziehungen zwischen Wassergehalt und Wasserspannung dargestellt.

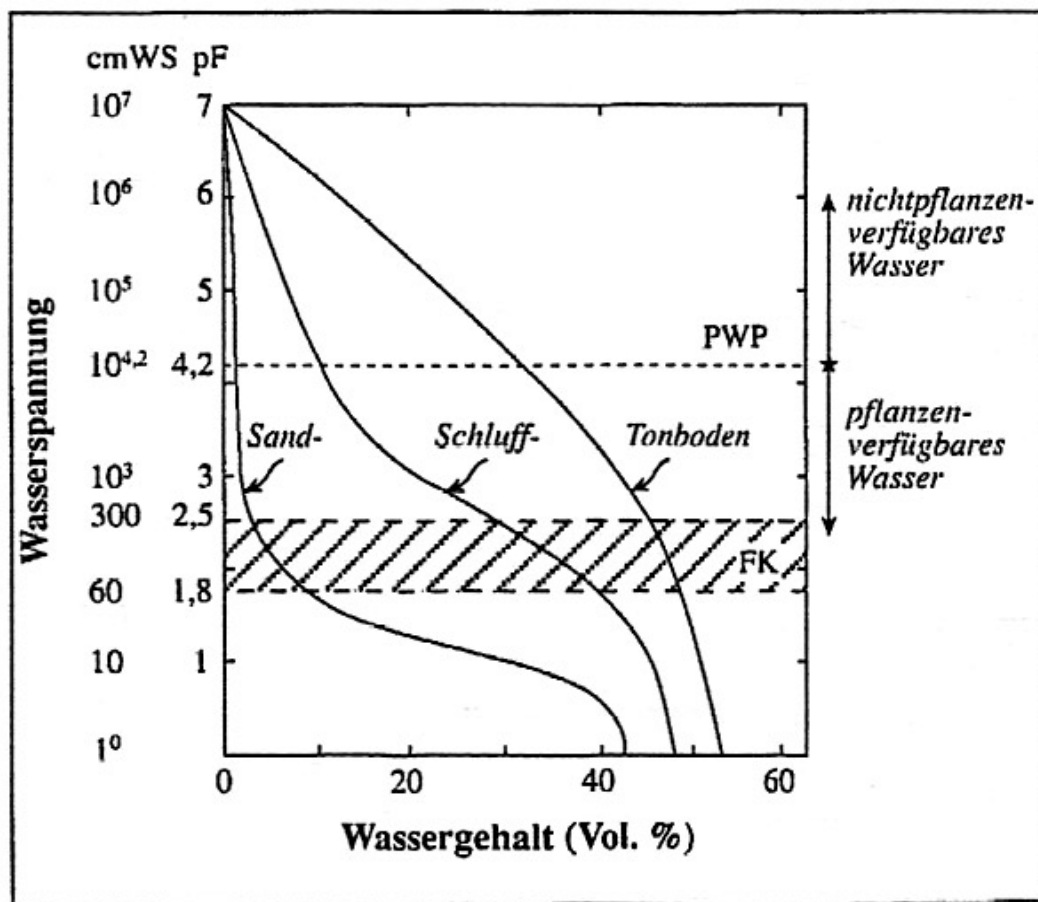


Abb. 8: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurven) der A-Horizonte von je einem Sand-, Schluff- und Tonboden, nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL et al. (1992)

Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser wird noch durch die Durchwurzelungsintensität der Pflanzen bestimmt, da nur Wasser aufgenommen werden kann, das im Wurzelraum der Pflanzen verfügbar ist. **Entscheidend für die Wasserversorgung der Vegetation ist also die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKeW).** Die Größe des effektiven Wurzelraumes ist abhängig von der Bodenart, der Lagerungsdichte und der Pflanzenart.

So benötigen Waldbestände eine nutzbare Feldkapazität von mindestens 195 bis 225 mm im effektiven Wurzelraum. Durch die starke Abhängigkeit der nFKeW von der Bodenart, muss der Waldvegetation auf sandigen Lehmen ein Wurzelraum von mindestens 0,8 m, auf tonigen Sanden von 1,15 m und auf Sanden von 1,9 m zur Verfügung stehen (BRAUNS et al. , 1996). In Tabelle 4 sind die Eigenschaften der Bodenarten Ton, Schluff und Sand hinsichtlich der eben besprochenen Kennwerte nochmals zusammenfassend dargestellt. Daraus wird deutlich, dass sich für die **Rekultivierung besonders schluffhaltige Böden eignen.**

Bodenart	FK	nFK	nFKWe	k _f (Orientierungswerte)
Ton	hoch	gering	gering	$< 10^{-7}$
Schluff	mittel	hoch	hoch	$10^{-5} - 10^{-7}$
Sand	gering	gering	gering	$10^{-3} - 10^{-4}$

Tabelle 4: Abhängigkeit der Wasserspeicherfähigkeit von der Bodenart

3.2.3. Empfehlungen zur Rekultivierung

3.2.3.1. Allgemeines

Gemäß TA Siedlungsabfall hat die Rekultivierungsschicht aus einer mindestens 1 m dicken Schicht aus kulturfähigem Boden zu bestehen, die mit geeignetem Bewuchs zu bepflanzen ist. Als weitere Bedingungen werden der Schutz der Dichtung vor Wurzel- und Frosteinwirkungen sowie Erosionsschutz gefordert. Aussagen hinsichtlich Bodenqualität und Pflanzenauswahl werden nicht getroffen.

Die nachstehenden Empfehlungen sollen eine Unterstützung bei der Rekultivierung geben und insbesondere Hinweise für den Bereich der Altablagerungen liefern, der nicht in der TA Siedlungsabfall geregelt ist. Die Aussagen basieren auf bis zur Veröffentlichung des Materialienbandes vorhandenen Regelwerken, die im Rahmen der Rekultivierung zu beachten sind (BBodSchG, DIN-Vorschriften, Technische Richtlinien der LAGA bzw. LABO).

3.2.3.2. Empfehlungen für den Einbau der Rekultivierungsschicht

Unter der Prämisse, dass die Rekultivierungsschicht vor allem in ihrer Funktion als Wasserhaushaltsschicht und Pflanzenstandort verstanden wird, sind folgende Parameter / Bedingungen entscheidend:

- Mächtigkeit der Schicht, mehrlagiger Einbau
- Bodensubstrat
- stoffliche Zusammensetzung (organische Substanz / Schadstoffe) / pH-Wert
- geordneter Einbau.

Mächtigkeit der Schicht, mehrlagiger Einbau

Zur Rekultivierung sollte nach Möglichkeit **Bodenmaterial des Umfeldes mit vergleichbarer Beschaffenheit** verwendet werden, um angenäherte Standortverhältnisse zu erreichen.

Die **Stärke** der Rekultivierungsschicht ergibt sich aus der späteren **Folgenutzung, der Art der geplanten Vegetation** (Wurzeltiefe) sowie dem verfügbaren Bodenmaterial. Empfehlungen der Fachliteratur reichen von > 1 m bis zu 3 m (DIBt, 1997, HÄMMERLE, 1997, KONOLD, 1995 etc.). Um einen Frostschutz der Dichtung zu gewährleisten, sollte sie jedoch mindestens 0,7 m mächtig sein.

Um die Durchwurzelungsgefahr zu minimieren, wird für Gräser- und Kräutersaaten bzw. Strauchpflanzungen eine Mächtigkeit von 1 m empfohlen (besonders über einer mineralischen Dichtung). Um jedoch überhaupt eine Vegetationsentwicklung zu ermöglichen, sind mindestens 0,5 m notwendig. Bei forst-/landwirtschaftlicher bzw. gärtnerischer Nutzung sollte die Rekultivierungsschicht mindestens 1,50 m – 3 m betragen.

Am Beispiel der in der Tabelle 5 aufgeführten Wurzeltiefen wird deutlich, dass Pflanzen unter Streßbedingungen sehr tief wurzeln können.

Pflanzenart	Wurzeltiefe [cm]
Ackerkratzdistel	80 - 150
Mehlige Königskerze	bis 150
Krauser Ampfer	bis 130
Glatthafer	bis 110
Ahorn	> 150
Buche	180 bis 300
Silberweide	bis 300

Tabelle 5: Wurzeltiefe einiger Pflanzenarten nach LINERT (1995) und KONOLD (1995)

In Analogie zur natürlichen Horizontabfolge ist der Aufbau der Rekultivierungsschicht schichtenweise vorzunehmen. Es empfiehlt sich ein mindestens **2-lagiger Aufbau** aus kulturfähigem Unterboden (synonym Mineralboden) sowie einer humosen Oberbodenschicht.

Der **Unterboden** sollte mit einer Lagerungsdichte von etwa $1,4 - 1,6 \text{ g/cm}^3$ eingebaut werden. Dabei ist auf einen niedrigen Humusgehalt zu achten, da sonst Zersetzungsprozesse in Gang kommen, die zu pflanzenschädigenden anaeroben Verhältnissen führen. Hinweise zur Auswahl des Bodenmaterials werden unter dem nachfolgenden Punkt "Bodensubstrat" gegeben.

Die Mächtigkeit der **humosen Oberbodenschicht** sollte zur Vermeidung von anaeroben Prozessen nicht mehr als 30 cm betragen. In erster Linie sollte für diese Schicht Mutterboden mit einer Lagerungsdichte zwischen $1,2$ und $1,4 \text{ g/cm}^3$ und einer nutzbaren Feldkapazität nFK von 200 mm verwendet werden. Aussagen zur Zumischung von Biokompost bzw. Klärschlamm werden unter dem Punkt "Stoffliche Zusammensetzung/pH-Wert" getroffen.

Die sickerwasserminimierende Funktion der Rekultivierungsschicht wird durch eine dritte Schicht (unter dem Unterboden) als sog. **Wurzelsperre** verstärkt. Dies kann eine stärker verdichtete Schicht von etwa 0,2 bis 0,3 m aus bindigem, sehr steinigem oder sehr sandigem Material sein. Als Wurzelsperre wirken hier die Dichte, die das Wurzelwachstum behindert bzw. der Körnungssprung. Bei Lagerungsdichten über $1,8 \text{ g/cm}^3$ wird ein Wurzelwachstum in der Regel unmöglich sein. Neben natürlichem Material kommen ebenso Geotextilien in Frage.

Bodensubstrat

Nach Möglichkeit sollte auf der Ablagerung standortangepaßtes Material verwendet werden, so dass zur Rekultivierung (je nach Standort) verschiedene Bodenarten zum Einsatz kommen können. Geeignete Materialien sind in der DIN 18 915, Bl. 1 aufgeführt (s. Tabelle 6) und reichen von nichtbindigen bis zu bindigen Böden. Idealerweise sind für den kulturfähigen **Unterboden** Materialien der Bodengruppen **(BG) 2, 4 und 6** zu nutzen. Die Bodengruppen 3, 5 und 7 eignen sich auf Grund ihres höheren Grobbodenanteils nur für die unteren Lagen der Rekultivierungsschicht als Wurzelsperre.

BG	Bezeichnung	Kornanteile d < 0,06 mm	[Gew.-%] d > 20 mm	Größtkorndurchmesser [mm]
2	nichtbindiger Boden	≤10	≤10	50
4	schwach bindiger Boden	> 10 - ≤ 20	≤10	50
6	bindiger Boden	>20 - ≤ 40	≤10	50
3	nichtbindiger, steiniger Boden	≤10	≤30	200
5	schwach bindiger, steiniger Boden	>10 - ≤ 20	≤30	200
7	bindiger, steiniger Boden	>20 - ≤ 40	≤30	200

Tabelle 6: Bodenarten nach DIN 18 915, Bl. 1

Eine standortangepasste Materialauswahl wird unterstützt durch folgende Unterlagen:

- Bodenkarte 1 : 50.000 (BK 50) (detaillierte Darstellung der Bodenbeschaffenheit)
- Mittelmaßstäbliche Landwirtschaftliche Standortkartierung (MMK)
- Forstliche Standortkartierung (FSK).

Die Einsichtnahme in die genannten Karten kann im LfUG, Abteilung Boden und Geochemie, erfolgen.

Wird im Vergleich zu den Standortgegebenheiten die **Sickerwasserminimierung** durch erhöhte Transpirationsleistung der Vegetation **in den Vordergrund** gestellt, so sind als besonders geeignete Pflanzenstandorte **lehmige Böden bzw. Substrate mit einem mittleren Gehalt an Schluff und Ton** zu verwenden. Dies führt bei sehr sandigen Substraten der Umgebung zum Widerspruch. Im Sinne einer langfristig wirksamen Rekultivierung sollte dem als Pflanzenstandort besser geeigneten Bodensubstrat der Vorzug gegeben werden. In Tabelle 7 sind hierfür geeignete Materialien

dargestellt. Der Grobbodenanteil des Bodensubstrates (Durchmesser > 2 mm) sollte möglichst gering sein.

Bodenart	Schluffanteil [Gew.-%]	Tonanteil [Gew.-%]
lehmiger Sand (Sl)	10 – 40	8 – 17
schluffiger Sand (Su)	10 – 50	0 – 15
Toniger Sand (St)	0 – 15	5 – 25
sandiger Lehm (Ls)	15 – 50	15 – 45
sandiger Schluff (Us)	50 – 80	0 – 17

Tabelle 7: Zur Rekultivierung besonders geeignete Bodenarten

Werden hinsichtlich der Folgenutzung konkrete Rekultivierungsziele vorgegeben, sind deren Anforderungen bei der Wahl des Bodensubstrates zu beachten. Folgende Beispiele (Tabelle 8) sind exemplarisch:

Folgenutzung	Bodensubstrat
Halbtrocken- und Trockenrasen	sandige Substrate
Sukzessionsflächen	Anpassung an natürliche Standortverhältnisse
Landwirtschaftliche / gartenbauliche Nutzung	BG 4 (schwach bindiger Boden) bzw. Sl (lehmiger Sand) Su (schluffiger Sand) Ls (sandiger Lehm) Us (sandiger Schluff)
forstliche Nutzung	Anpassung an natürliche Standortverhältnisse, aber möglichst schluffhaltig, höherer Grobbodenanteil möglich

Tabelle 8: Nutzungsabhängige Bodenarten

Stoffliche Zusammensetzung / pH-Wert

Grundsätzlich sollte nur unbelasteter Bodenaushub bis zum Zuordnungswert Z1.1 der Tabelle II 12.2.-2 [Zuordnungswerte Feststoffe für Böden] der Technischen Regeln der LAGA "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen" (1997) eingebaut werden. Die Verwendung von Bodenmaterial mit dem Zuordnungswert Z1.2 ist im Einzelfall anhand der Standortgegebenheiten (Hintergrundwerte bzw. hydrogeologischen Verhältnisse) zu entscheiden. Böden mit dem Zuordnungswert Z2 dürfen nicht als Rekultivierungssubstrat eingesetzt werden.

Bei der **Verwertung organischer Abfälle** (Biokompost und Klärschlamm) sollten die Technischen Regeln der LABO / LAGA zur "Abfallverwertung auf devastierten Flächen" (1995) bzw. die Klärschlammverordnung in der jeweils gültigen Fassung beachtet werden. Diese Technischen Regeln wurden explizit zur Rekultivierung ehemaliger Tagebauflächen geschaffen. Indem hier jedoch für Biokompost bzw. Klärschlamm die maximal zulässigen Nährstofffrachten (Stickstoff, Phosphor, Kalium) sowie die maximal zulässigen Konzentrationen an Schwermetallen geregelt werden, stellen sie eine gute Richtlinie auch bei der Rekultivierung von Ablagerungen dar. Die Höhe der dargestellten Nährstofffrachten steht in Relation zur Nutzung der Fläche, der Mobilisierbarkeit / Verfügbarkeit der Nährstoffe und den hydrogeologischen Verhältnissen. Es werden entsprechende Nutzungsklassen definiert sowie eine Bewertung der Standortkategorien vorgenommen. **Anhang 4** enthält eine Übersicht zu **Nährstofffrachten bzw. maximalen Schadstoffgehalten**.

Generell ist zu beachten, dass eine Ausbringung organischer Stoffe nur in der oberen Bodenschicht (bis maximal 30 cm Tiefe) erfolgen darf.

Eine Ausbringung organischer Abfälle ist gemäß o.g. LABO / LAGA-TR zu unterlassen, wenn

- die zur Anwendung vorgesehene Fläche nicht ordnungsgemäß vorbereitet ist, z. B. bei ungenügender Standsicherheit,
- das Bodensubstrat Tongehalt < 5 % hat,
- der pH-Wert der Grundmelioration nicht dauerhaft pH 5 überschreitet,
- das zu rekultivierende Gebiet innerhalb der Trinkwasserschutzzone I-II liegt,
- innerhalb von 10 m des Aufbringungsbereiches Oberflächengewässer liegen.

Die Bodenmaterialien sollten neutrale bis schwach saure Bodenreaktionen (optimal pH 5,5 – 7,0) aufweisen.

Anforderungen an den Einbau (nach DIN 18 915)

Grundsätzlich führt jede Bodenumlagerung zu Gefügeänderungen, die sich in einer Verringerung des Porenvolumens, einer Änderung der Porengrößenverteilung sowie einer Verdichtung des Bodens äußern können. Durch geeignete technische Maßnahmen ist die **Verdichtung bzw. Vernässung** bei der Aufbringung des Bodenmaterials unter Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit **weitestgehend zu minimieren**. Die hierzu folgenden Empfehlungen konzentrieren sich auf die Prüfung des Materials und die bautechnische Ausführung.

Vor dem Einbau sind anhand der zur Verfügung stehenden Mengen und Qualitäten Schüttpläne erarbeitet werden. Ebenso ist auf eine einwandfreie Deklaration des angelieferten Materials zu achten und die grundsätzliche Eignung der Böden nach DIN 18 915, Blatt 1, nachzuweisen. Anhand einfacher Feldtests sind folgende Parameter abzuschätzen:

- Bodenart (Ausrollversuch mit feuchter Probe)
- Bodenfeuchte
- Skelettanteil
- pH-Wert (Prüfung einer aufgeschlämmten Probe mittels Teststreifen)
- organische Substanz (Geruch, Farbe)

- organoleptische und optische Prüfung auf erkennbare, nicht tolerable Inhaltsstoffe.

Ergibt sich aufgrund der Prüfung ein **Verdacht auf schädliche Inhaltsstoffe**, sind chemische Untersuchungen erforderlich. Eine umfangreiche Übersicht über Untersuchungsverfahren ist in Anhang A der DIN 19 731 "Verwertung von Bodenmaterial" gegeben.

Um Gefügebeeinträchtigungen gering zu halten, sollten **Bodenarbeiten** nur bei den der **Bodengruppe entsprechenden Konsistenz** durchgeführt werden. Nach DIN 19 731 ergeben sich folgende Bedingungen für den Einbau (Tabelle 9):

Eignung zum Einbau	Feuchtezustand nicht bis schwach bindiger Böden ($\leq 17\%$ Ton)	Konsistenz bindiger Böden (nach DIN 19 682-5) ($> 17\%$ Ton)
optimal	trocken bis schwach feucht (Probe wird bei Wasserzugabe dunkler)	halbfest
tolerierbar	feucht (Finger werden etwas feucht, Probe wird bei Wasserzugabe nicht dunkler)	steifplastisch
unzulässig	stark feucht (Wasseraustritt beim Klopfen) bis nass (Boden zerfließt)	weich bis breiig

Tabelle 9: Einbau der Böden in Abhängigkeit vom Feuchtezustand nach DIN 19 731

Große Rekultivierungsflächen sollten in **Bauabschnitte von einem Hektar** unterteilt und unmittelbar nach dem Bodenauftrag begrünt werden.

Das **Bodenmaterial** sollte **in einem Arbeitsgang** ohne Zwischenbefahrung aufgetragen werden. Große Flächen sollten möglichst mit dem gleichen Material abgedeckt werden, da sehr kleinräumige Wechsel der Substratqualität zu Problemen bei der anschließenden Begrünung führen. Ist dies nicht möglich, sollte ein Vermischen vermieden werden und die verschiedenen Herkünfte in zusammenhängenden Flächen eingebaut werden. Im Anschluß an den Bodenauftrag ist die Bodenoberfläche einzuebnen.

Optimal ist ein **Vorkopfeinbau** mit Hilfe von Radladern. Notwendige Befahrungen sollten sich auf Fahrgassen beschränken. Bei den verwendeten Geräten ist auf eine möglichst geringe Flächenbelastung zu achten. Möglichkeiten sind der Einsatz von Kettenfahrzeugen, Breit- oder Terra-Reifen oder bereits eine leichte Absenkung des Reifenluftdruckes im Rahmen der Fahrsicherheit. Die maximale Pressung sollte 15 kPa nicht überschreiten. Zu einer Verminderung der Verdichtung können die Fahrgassen auch mit Reismatten armiert werden.

Bei der Verwendung von Klärschlamm bzw. Kompost sind diese Stoffe möglichst in einem Arbeitsgang ohne Zwischenbefahrung aufzutragen. Die Einarbeitung muss sofort an die Ausbringung erfolgen. Nach der Abfallausbringung sind die Flächen frühestmöglich zu begrünen.

Entstandene **Verdichtungen** sind im Rahmen einer Unterbodenlockerung zu **beseitigen**. Festlegungen zur Durchführung solcher Maßnahmen sind in der DIN 1185 getroffen. Besonders ist auf den Einsatz von bewegten Lockerungsscharen zu verweisen, da hier geringere Zugkräfte nötig

sind und damit die Gefahr einer Verschmierung der oberen Bodenschichten durch Radschlupf verringert werden kann. Bei sehr bindigen Materialien sollte die Tiefenlockerung in zwei Arbeitsgängen mit verschiedenen Arbeitstiefen erfolgen. Um die Einbauorte des angelieferten Materials bei auftretenden Problemen auch später noch feststellen zu können, sind die Firmen angehalten, genaue Bautagebücher mit Schüttplänen zu führen.

3.2.3.3. Hinweise für die Auswahl der Vegetation

Allgemeines

Die Begrünung von Ablagerungen ist schnellstmöglich nach dem Bodenauftrag vorzunehmen. Sie erfolgt i. d. R. durch Aussaat von Grasgemischen bzw. Anpflanzen von Gehölzen (besonders Sträucher). Unter Berücksichtigung der potentiellen natürlichen Vegetation der Umgebung bzw. ihrer Ersatzgesellschaften sollten geeignete Pflanzenarten verwendet werden. Des weiteren ist bei der Pflanzenwahl auf die verwendeten Bodenmaterialien abzustellen. Bei einer geringmächtigen Rekultivierungsschicht sollten nur flachwurzelnende Gräser und Gehölze verwendet werden. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass Tiefwurzler nie völlig ausgeschlossen werden können.

Primäres Ziel der Rekultivierung von Ablagerungen ist die Sickerwasserminimierung. Durch eine gezielte Pflanzenauswahl können die Prozesse der

- Transpiration und
- Interzeptionsverdunstung

maximiert werden, dass nur geringe Mengen an Niederschlagswasser versickern.

Die Intensität dieser Prozesse wird durch die Pflanzenart und die Bodenverhältnisse bestimmt (s. auch Kapitel 3.2.2.2). Die Ausschöpfung des Bodenwasservorrates ist eng an die Ausbildung eines leistungsfähigen Wurzelsystems gebunden. Die höchste Sickerwasserminimierung durch Transpiration und Interzeptionsverdunstung wird durch Bäume erreicht.

Unter den in Sachsen herrschenden Klimabedingungen ergeben sich folgende Werte für die **Transpirationsleistung geschlossener Pflanzenbestände** (LARCHER, 1994):

- Trockenrasen ca. 200 mm.
- Grünland, Mähwiesen, Weiden 300 bis 400 mm
- Hochstaudenfluren 800 bis 1500 mm
- Laubwälder 500 bis 800 mm
- Nadelwälder 300 bis 600 mm.

Die **Interzeptionsverdunstung** ist abhängig von der benetzbaren Oberfläche der Pflanzen und vom Blattflächenindex (LAI, Blattfläche in m^2 je m^2 Boden). Von den verschiedenen Pflanzenbeständen werden folgende Mengen (bezogen auf Freilandniederschlag) interzipiert (LARCHER, 1994):

- Grasland 3-5%
- Laubholzbestände 15 bis 30 %
- in Nadelwäldern 20 bis 35 % (in sehr dichten Beständen bis 50 %).

Ob eine Rekultivierung mit Bäumen erfolgen kann, ist von verschiedenen Faktoren wie

- Einpassung in die Landschaft
- realisierbare Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht
- Anforderungen an die Nachsorge

abhängig und muss im Einzelfall entschieden werden.

Bei einer Altablagerung (kaum bzw. keine Gasentwicklung, keine Setzungen) ist eine Wiederbewaldung unter Beachtung standortspezifischer Gegebenheiten sicher möglich. Bei einer Altdeponie wird dies jedoch im Rahmen der Nachsorge nicht machbar sein. Die Bepflanzung muss hier mittels Gras- und Krautvegetation erfolgen. Dabei reicht auch eine geringmächtigere Rekultivierungsschicht aus. Allerdings muss ein Eindringen von Deponiegasen in die Rekultivierungsschicht verhindert werden.

Pflanzenauswahl, Saat- und Pflanzarbeiten, Pflege

Sukzession

Die Sukzession (ein Sich-selbst-überlassen der Fläche) erscheint unter Kosten- und ökologischen Gesichtspunkten vorteilhaft, ist aber nicht in jedem Umfeld realisierbar und führt nicht zwangsläufig zu einer stabilen Vegetation. Sukzessionsflächen entwickeln sich ausgehend von krautigen Gesellschaften über Strauchvegetation und Vorwaldstadien zum Hochwald (meist Buche, in höheren Lagen Fichte, auf Sandböden Eichen-Kiefernwälder). Dieses Endstadium wird erst nach weit mehr als 60 Jahren erreicht. Ein Begrünen bzw. Bepflanzen der Oberfläche ist im Rahmen der Rekultivierung von Ablagerungen immer erforderlich, so dass zumindest eine primäre Sukzession (Fläche völlig frei von Pflanzen) hier nicht in Frage kommt.

Auswahl von Rasengesellschaften / krautige Pflanzen

Im Gebiet des Freistaates Sachsen sind natürlich vorkommende Rasengesellschaften die absolute Ausnahme und nur auf Extremstandorten, wie sehr flachgründigen, häufig sandigen, nährstoffarmen und sonnigen Standorten zu finden. Der Großteil der heute vorhandenen Wiesen und Rasen ist auf anthropogene Einflüssen zurückzuführen. Andererseits bilden offene Rasenflächen wichtige Landschaftselemente und stellen Rückzugsflächen für seltene Tier- und Pflanzenarten dar.

Die Rekultivierung mit Rasengesellschaften ist insbesondere in folgenden Fällen begründet:

- Gewährleistung notwendiger Reparaturarbeiten in der Nachsorgephase von Altdeponien
- bei temporären Abdeckungen
- Einpassung in die Landschaft.

Die Artenauswahl sollte anhand der Vegetation der Umgebung erfolgen. Des weiteren sollten die Pflanzen folgende Bedingungen erfüllen:

- Widerstandsfähigkeit
- nicht miteinander in Konkurrenz tretend, schnellwüchsig
- Überdauern längerer Trockenperioden

- Winterhärte
- geringe Pflegemaßnahmen erfordernd.

Eine umfangreiche **Übersicht über Gräser** zur Begrünung von Ablagerungen mit Angaben zu den o. g. Punkten wie Standortansprüchen, Lebensdauer, Wurzeltiefe etc. ist in den **Anhängen 5 und 6** gegeben.

Für die Grasansaat ist eine Mischung aus verschiedenen Arten zu empfehlen. Verschiedene Arten stellen unterschiedlichen Standortansprüche und können so witterungsbedingte Streßsituationen (Trockenheit, Starkregen) besser ausgleichen.

Anhang 7 enthält eine **Übersicht über Saatgutmischungen** zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien für verschiedene Standorte. So kann für z. B. mittlere bis schwere trockene Böden die Mischung 7 aus Rotstraußgras, Schafschwingel, Rotschwingel und Wiesenrispe usw. im dargestellten Mischungsverhältnis verwendet werden.

Eine **weitere Übersicht über geeignete Saatgutmischungen** für Rasen findet sich in der von der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V. Bonn herausgegebenen Veröffentlichung "**Regel-Saatgut-Mischung**", Ausgabe 1998. Hierbei werden Rasenmischungen für verschiedene Nutzungsarten, Klimaräume, Standortansprüche (sonnig, schattig etc.), Pflegeansprüche sowie notwendige Aussaatmengen dargestellt. Die Broschüre kann bei der o. g. Gesellschaft unter der Telefonnummer 0228/69 00 28 bezogen werden.

Zur Sickerwasserminimierung sind besonders *Deutsches Weidelgras (Lolium perenne, kann bei allen Bodenarten verwendet werden)* sowie viele Kleearten (*Trifolium spec., für schwach bis bindige Böden*) geeignet. Diese Pflanzen können jedoch sehr tief wurzeln (> 1m) und sollten nicht bei einer mineralischen Dichtung aus sehr schrumpffähigem Material eingesetzt werden. Sehr pflegearm ist Ginster, der sehr beständig ist und andere Arten verdrängt.

Beispiele für Trocken- und Halbtrockenrasen (für sandige Substrate) sind in **Anhang 8** aufgeführt.

Für Gräser stehen **verschiedene Methoden der Ansaat** zur Verfügung. Prinzipiell sollten Ansaaten nur bei windstillem Wetter erfolgen. Bei Sommeransaaten, an sehr steilen Böschungen oder bei Ansaaten auf Rohböden empfehlen sich Nassansaatverfahren, um günstigere Keimbedingungen zu schaffen. Generell ist auch der Einsatz von Jutematten zu empfehlen, der Pflanzen ersten Halt bietet und gerade in der Anfangsphase vor Erosion schützt.

Bei sehr mageren Standorten empfiehlt sich eine Düngergabe nach dem ersten Schnitt mit 5 g/cm³ Stickstoff. Für **Saatarbeiten** sind die Monate März bis Oktober zu nutzen, die Bodentemperatur sollte bei mindestens 8°C liegen. Die Ansaat erfolgt bei kleinen Flächen manuell, ansonsten ist maschinelles Drillen möglich.

Die ersten Schnitte sollten bei einer Bestandshöhe von etwa 6 bis 10 cm auf eine Höhe von 4 cm durchgeführt werden, um eine **raschere Verdichtung der Grasnarbe** zu erreichen. Zur Ansiedlung artenreicher Bestände als Ausgangspunkt für Sukzessionen bietet sich auch die Heublumensaat an. Dabei wird die Fläche mit dem Mähgut von Wiesen gemulcht, das zur Zeit der Samenreife gewonnen wurde.

Krautige Pflanzen werden mit Ausnahme von Leguminosen zur Bodenverbesserung kaum künstlich angesiedelt. Besonders die Ruderalarten werden mit dem Aufbringen von Mutterboden angesiedelt und weisen häufig eine sehr hohe Konkurrenzskraft gegenüber allen anderen Arten auf. Werden zur Rekultivierung Gehölze (Sträucher) geplant, ist es notwendig, Flächen von krautigen Pflanzen frei zu halten. Dies geschieht in der Regel durch Mulchen; auf Herbizide sollte verzichtet werden. In **Anhang 9** sind verschiedene **Sträucher zur Begrünung** dargestellt.

Besonders bei Altdeponien / Deponien ist der Rasen 1-2 * pro Jahr zu mähen, dass auch das Beseitigen von tiefwurzelnden krautigen Pflanzen (vor allem Ruderalarten wie Löwenzahn können 2-3 m tief wurzeln) mit einschließt. Des weiteren ist die Rasenoberfläche auf mögliche Ausfallstellen (keine Grasnarbe) zu kontrollieren und entsprechend nachzupflanzen.

Auswahl von Vorwaldgesellschaften / Waldgesellschaften

Über die Rekultivierung mit Bäumen auf Ablagerungen liegen bisher kaum Erfahrungen vor (überwiegend aus ehemaligen Braunkohletagebauegebieten). Entscheidender Vorteil beim Rekultivierungsziel Wald ist die im Vergleich zu anderen Pflanzenarten wesentlich erhöhte Verdunstungsleistung und damit einhergehende Sickerwasserminimierung. Damit ist im Wege einer angestrebten Langzeitsicherung eine Sickerwasserminimierung über die Funktionsfähigkeit der Dichtung hinaus gegeben.

Voraussetzungen hierfür sind:

- eine ausreichend mächtige Rekultivierungsschicht (s. 3.3.2.1)
- das Entlassen aus der Nachsorgephase insbesondere bei Deponien / Altdeponien
- standörtliche Gegebenheiten (Einpassung in die Landschaft).

Neben diesen Vorteilen muss auf die mögliche Gefahr eines Windbruchs hingewiesen werden, der große Wurzelkrater hinterläßt. In der Regel wird bei Rekultivierungen nicht die Vegetation des Zielwaldes etabliert. Vielmehr werden Vorwälder angesiedelt. Die Vorteile bestehen im Aufschluß des Bodens durch die im allgemeinen anspruchsloseren Arten des Vorwaldes, der relativ schnellen Entwicklung leistungsfähiger Bestände mit hohen Transpirationsleistungen sowie einer kostengünstigen Waldetablierung.

Vorwälder entsprechen fortgeschrittenen Stufen der Sukzession und ermöglichen eine standortangepasste Weiterentwicklung. Sie sind meist durch Weiden, Pappeln und Birke geprägt und weisen meist eine im Vergleich zu den Zielwäldern dichtere Strauchschicht mit größerer Artenvielfalt auf. Zum Erhalt dieser Vegetation ist jedoch eine regelmäßige Pflege notwendig. Dabei müssen unerwünschte Arten entfernt und die zu erhaltenden Arten je nach Bedarf auf den Stock zu setzen. Diese Maßnahmen sind aller 4 bis 10 Jahre durchzuführen.

Eine Etablierung und Erhaltung von Vorwaldstadien sollte in **ökologisch verarmten Landschaftsgebieten** und auf Teilbereichen von geplanten Erholungs- und Freizeitflächen erfolgen. U. a. sind sie ideale Rückzugsgebiete für Tiere und Pflanzen. Vorwaldgesellschaften stellen eine Alternative für Landschaften dar, in der eine Bewaldung nicht der Umgebung entsprechen würde, die Erhaltung von Wiesen aber mit unverträglich hohem Aufwand verbunden wäre.

In **Anhang 10** sind einige **typische Vorwaldgesellschaften** mit ihren Standortansprüchen aufgeführt. Als Grundlage für **Empfehlungen zur Ansiedlung von Wäldern (Zielwald)** auf Altablagerungen können die forstlichen Wuchsgebiete und Wuchsbezirke nach SCHWANECKE & KOPP (1996) herangezogen werden. Die Standortregionen sind charakterisiert durch verschiedene Ausgangsgesteine der Bodenbildung, besondere Merkmale des Reliefs und unterschiedliche Klimabedingungen. In **Anhang 11** ist eine Übersicht über die **Standortregionen und Wuchsgebiete** gegeben. Die **Ansiedlung von Gehölzen** kann mittels **bewurzelter Pflanzen** sowie **vegetativ vermehrbarer Pflanzenteile** (Triebstecklinge, Steckhölzer, Setzstangen, Ruten) erfolgen.

Bewurzelte Pflanzen stehen als Ballen- oder wurzelnackte Ware zur Verfügung. Bewurzelte Ballenware sollte in der Zeit von März bis November eingebaut werden. Eine Herbstpflanzung ist die optimale Variante, eine Sommerpflanzung sollte, besonders in trockenen Lagen, vermieden werden. Arbeiten mit wurzelnackten Pflanzen sind generell nur im Frühjahr (März bis Mitte Mai) und im Herbst (Oktober bis Mitte Dezember) durchzuführen. Bewurzelte Pflanzen bieten den Vorteil größerer Sicherheit beim Anwachsen, stehen aber meist nicht in ausreichender Anzahl als standortangepasste Ware zur Verfügung

Vegetativ vermehrbare Pflanzenteile sollten möglichst verholzt, saftig und ausschlags- und bewurzelungsfähig sein, Schnittflächen sollen möglichst kleinflächig und glatt sein. Besonders geeignet sind einige Weidenarten (Silber-, Grau-, Bruch-, Lorbeer-, Purpur-, Mandel- und Korbweide), Schwarzpappel, Liguster, Gemeine Heckenkirsche, Schwarzer und Roter Holunder und der Gemeine Hartriegel. Die Pflanzenteile lassen sich in der Umgebung meist leichter in ausreichender Zahl beschaffen, es ist aber unter Umständen mit höheren Ausfallraten zurechnen. Die Gewinnung und der Einbau dieser Pflanzenteile soll prinzipiell in der Zeit der Vegetationsruhe von Oktober bis April erfolgen.

Abschließend sollen einige **Hinweise für Pflanzverfahren für geneigte Flächen** gegeben werden. Bei Pflanzungen an Hängen empfiehlt sich die Verwendung von **Rillen- oder Pultpflanzungen**. Bei beiden werden parallel zum Hang Gräben ausgehoben, wobei der Aushub hangabwärts zu einem Wall aufzuschütten ist. Bei der Rillenspflanzung wird in den ausgehobenen Graben gepflanzt, das verwendete Pflanzgut sollte eine Höhe von 80 bis 100 cm haben. Ist die Vegetationstragschicht von geringer Mächtigkeit, wird das Pflanzgut in den Wall eingebracht (Pultpflanzung), dabei es eine Höhe von maximal 50 cm aufweisen. Generell sollte der Bereich um die Pflanzung gemulcht werden, um den Konkurrenzdruck durch krautige Pflanzen in der Anwuchsphase zu verringern.

Für **sehr steile Böschungen** empfiehlt sich der **Busch- und Heckenlagenbau**. Es werden vom Fuß des Hanges ausgehend grabenartige Stufen mit einer ca. 50 cm breiten Sohle und mit einer Neigung nach innen von mindestens 10 % ausgehoben.

Für die Verwendung in Buschlagen eignen sich besonders Weidenarten, Schwarzpappel, Liguster, Gemeine Heckenkirsche, Schwarzer und Roter Holunder und der Gemeine Hartriegel. Für den Heckenlagenbau sollten Arten mit der Fähigkeit zur Adventivwurzelbildung (Fähigkeit der Wurzelneubildung am Wurzelhals) genutzt werden, wie z. B. Grauerle, Sal- und Purpurweide, Zitterpappel, Vogelbeere, Hainbuche, Roter Hartriegel, Rote Heckenkirsche, Gemeine Birke, Hasel, Weißdorn, Pfaffenhütchen, Esche, Sanddorn und Liguster. Die Anlage von Heckenlage sollte in den

Monaten März bis Mitte Mai und Oktober bis Mitte Dezember erfolgen, während Buschlagen in der Zeit von Oktober bis April erstellt werden können.

3.2.4. Simulationsmodelle

Modelle zur Simulation des Wasserhaushaltes von Deponien beinhalten spezifische Lösungen zur Nachbildung der Evapotranspiration, des Oberflächenabflusses und der Bodenwasserbewegung (im ungesättigten Bereich). Durch Modellierung der in einem zeitlich und räumlich abgegrenzten System stattfindenden Prozesse ist eine verbesserte Abschätzung der Durchsickerung von Rekultivierungsschichten möglich. Je nach Lösungsansatz, Anzahl der betrachteten Raumdimensionen bzw. der räumlichen sowie zeitlichen Auflösung lassen sich Wasserhaushaltsmodelle nach unterschiedlichen Kriterien definieren.

In der Literatur wird eine Vielzahl von Modellen beschrieben. Diese sind jedoch teilweise nicht frei verfügbar und wurden mit unterschiedlichen Modellierungsschwerpunkten (Hydrologie, Bodenkunde, Ingenieurwissenschaften etc.) entwickelt. Wasserhaushaltsmodelle erbringen daher i. d. R. keine deckungsgleichen und meist auch nicht direkt vergleichbaren Ergebnisse. Generell sollte die Anwendung eines geeigneten Modells für den jeweiligen Zweck geprüft werden und die Auswahl nach folgenden Punkten erfolgen:

- Ziel der Modellrechnungen (z. B. Betonung der Verdunstungsermittlung, Wirkung der Rekultivierungsschicht, Separation einzelner Abflußanteile)
- Einfluß der inneren Struktur der Deponie
- Relevanz von Klimadaten, Hangneigung und -ausrichtung.

Speziell für die Simulation des Wasserhaushalts von Abdichtungssystemen für Deponien und Altlasten wurde das HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance)-Modell entwickelt. In **Anhang 12** erfolgt eine Kurzbeschreibung des Modells. Hinweise zur Anwendung des Systems werden ebenso in der Empfehlung A2-55 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT, UAG 7) zum Thema "Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien" gegeben. Die Empfehlung wurde in der Zeitschrift für Bautechnik, Heft 9 / 1998 veröffentlicht.

Zur Modellierung des Wasserhaushaltes von Bergehalden wurde das Modell BOWAHALD (DUNGER, 1995, 1997) entwickelt. Das Modell kann durch die Bergakademie Freiberg, Institut für Hydrogeologie, bezogen werden. In Sachsen wird BOWAHALD zur Unterstützung der Sanierung der WISMUT-Flächen verwandt. Hinsichtlich weiterer Simulationsprogramme (generelle Übersicht) wird auf SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1997) verwiesen. Das Modell BOWAHALD wird in **Anhang 13** dargestellt. Eine Erläuterung der wesentlichen Elemente des Wasserhaushaltes wird in **Anhang 14** gegeben.

Weitere frei verfügbare bodenphysikalische Modelle, die die Verdunstung und den gesättigungs-ungesättigten Wasserfluss im Boden erfassen, sind u. a.:

- SWMS-2D (SIMUNEK et al., 1994)
- HILLFLOW (BRONSTERT, 1994)
- SWATRE (BELMANS et al., 1983).

4. Literatur

- /1/ AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter in der BRD. 4. Auflage. Hannover.
- /2/ ALBERS, K.-H. (1997): Wirksamer Grundwasserschutz durch Oberflächenabdichtungen mit Kunststoff-Flächenabdichtungen. - In: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten, Planung - Bau - Kosten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 103, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- /3/ ALEXIEW, D.; BERKHOUT, H. & KIRSCHNER, R. (1994): Zur Standsicherheit von Oberflächenabdichtungssystemen mit Bentonitmatten. - In: Geokunststoff-Ton-Dichtungen GTD, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Heft 71, München.
- /4/ ALEXIEW, N. (1999): Neue Perspektiven für Geosynthetische Tondichtungsbahnen durch die Verwendung von Calcium-Bentonit.- K-Geo 1999, Geotechnik Sonderheft 1999.
- /4/ AMANN, P. & JELINEK, D. (1996): Aufbau und Wirkungsweise der Kapillarsperre. Workshop Die Kapillarsperre, Dresden.
- /5/ BERGER, K. & SOKOLLEK, V. (1997): Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw. möglich ? - In: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten. Planung - Bau - Kosten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 103, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- /6/ BERGER, K. (1998): Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Simulationsmodellen für den Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen für Deponien, aufgezeigt am HELP-Modell. In Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Inst. für Bodenkunde, Univ. Hamburg.
- /7/ BRAUNS, J.; MAST, K.; SCHNEIDER, H.; KONOLD, W.; WATTENDORF, P. & B. LEISNER (1996): Rekultivierungen für forstliche Nutzung bei Deponien mit Regeldichtung. Kurzfassung zum Forschungsbericht: Erarbeitung von Regeln zur Herstellung einer Rekultivierungsschicht bei Deponien mit dem Stand der Technik entsprechenden Oberflächenabdichtungssystemen unter Beachtung forstwirtschaftlicher Belange, Stuttgart.
- /8/ BUND DER INGENIEURE FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABFALLWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (BWK) E.V. (1998): Temporäre Oberflächenabdeckung von Siedlungsabfalldéponien (Altdeponien), Berichte 1/1998.
- /9/ BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (BAM) (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsabdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldéponien sowie für Abdichtungen für Altlasten, Berlin.
- /10/ BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (BAM) (1994): Stellungnahme zum System GEOLOGGER, einem System für die Dichtigkeitsüberwachung und Leckortung an Deponiedichtungen, Dichtungen zu Sicherungen von Altlasten, Erdtanks u. ä., Berlin.
- /11/ BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (BAM) (1995): Anforderungen an die Schutzschicht für die Dichtungsbahnen in der Kombinationsabdichtung - Zulassungsrichtlinie für Schutzschichten, Berlin.
- /12/ BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (BioAbfV). BGBl 1998, Teil I Nr. 65.
- /13/ BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN T. (1994): Ausführungsvarianten von Oberflächenabdichtungssystemen und Hinweise zu deren Auswahl. In: Oberflächenabdichtungssysteme im Deponiebau und in der Altlastensicherung, Schr. Angew. Geol., Bd. 34, Karlsruhe.
- /14/ BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. (1995): Kontrollierbare Abdichtungssysteme für Deponien und Altlasten. - In: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten - Abdichtung oder Abdeckung?, Schr. Angew. Geol., Bd. 37, Karlsruhe.

- /15/ BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. (1996): Invest- und Folgekostenermittlung von Oberflächenabdichtungen und Rekultivierungsmaßnahmen. - In: Oberflächenabdichtung oder Oberflächenabdeckung ? Regelwerke oder alternative Systeme?, Schr. Angew. Geol., Bd. 45, Karlsruhe.
- /16/ DARCY, H. (1856): Les fontains publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris.
- /17/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBt) (1995): Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen, Berlin.
- /18/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBt) (1996): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-67.11-1 vom 23. 07.1996, Berlin.
- /19/ DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR Geotechnik e. V. (DGgT) (1998): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke", UAG 7 - Empfehlung A 2-55 - Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien. In: Bautechnik 75, Heft 9/1998.
- /20/ DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e. V. (DVWK) (1995): Deponieabdichtungen in Asphaltbauweise - Entwurf zum Merkblatt, Bonn.
- /21/ DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e. V. (DVWK) (1996): Deponieabdichtungen in Asphaltbauweise - Merkblatt zur Wasserwirtschaft Nr. 237/1996, Bonn.
- /22/ DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (DVWK) (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Heft 238.
- /23/ DIN 1185 (1973): Dränung, Regelung des Bodenwasserhaushaltes durch Dränung, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /24/ DIN 4022-1 (1987): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreibungen von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /25/ DIN 4220 (1998): Bodenkundliche Standortbeurteilung. Teil 1: Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierung), Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /26/ DIN 4049, Teil 3, (1994): Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /27/ DIN 4084 ff (1981): Baugrund; Gelände- und Böschungsberechnungen, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /28/ DIN 18 122 (1997): Baugrund; Untersuchungen von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /29/ DIN 18 130 (1998): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes Teil 1: Laborversuche, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /30/ DIN 18 134 (1993): Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte; Plattendruckversuch, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /31/ DIN 18 200 (1986): Überwachung (Güteüberwachung) von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten, Allgemeine Grundsätze, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /32/ DIN 18 915 (1990): Vegetationstechnik im Landschaftsbau. Bodenarbeiten, Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- /33/ DIN 18 917 (1990): Vegetationstechnik im Landschaftsbau. Rasen und Saatarbeiten, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /34/ DIN 18 918 (1990): Vegetationstechnik im Landschaftsbau. Ingenieurbiologische Sicherheitsbauweisen, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /35/ DIN 18 919 (1990): Vegetationstechnik im Landschaftsbau. Entwicklungs- und Unterhaltungspflege von Grünflächen, Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /36/ DIN 19 682-5 (1997): Bestimmung des Feuchtezustandes des Bodens, Beuth Verlag, Berlin / Köln.

- /37/ DIN 19 731 (1998): Verwertung von Bodenmaterial. Beuth Verlag, Berlin / Köln.
- /38/ DIN ISO 9000 bis DIN ISO 9004 (1998): Qualitätsmanagementsysteme, Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- /39/ DRITTE ALLGEMEINE VERWALTUNGSVORSCHRIFT ZUM ABFALLGESETZ (TA SIEDLUNGSABFALL, 1993): BAnz. Nr. 99a.).
- /40/ DUNGER, V. (1995): Kurzdokumentation des Computerprogramms ROHALDE zur quantitativen Abschätzung des Oberflächenabflusses von Deponie- und Haldenflächen und der Bemessung von Entwässerungsgräben.
- /41/ DUNGER, V. (1997): Dokumentation des Modells BOWAHALD 2_D zur zweidimensionalen Simulation des Wasserhaushaltes von wassergesättigten Bergehalden und Deponien unter Berücksichtigung von Abdeckschichten.
- /42/ DYCK, S. & Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. - Verlag für Bauwesen, Berlin.
- /43/ ECKART, M. (1995): Modellentwicklung AERA zur Modellierung der Halde 371. Bericht für die Wismut GmbH (unveröff.)
- /44/ EGLOFFSTEIN, T.; MAINKA, A. & BURKHARDT, G. (1994): Standsicherheits- und Setzungsbetrachtungen bei Oberflächenabdichtungssystemen. - In: Oberflächenabdichtungssysteme im Deponiebau und in der Altlastensicherung, Schr. Angew. Geol., Bd. 34, Karlsruhe.
- /45/ EGLOFFSTEIN, T.; BURKHARDT, G. & HEIDRICH, A. (1995): Wasserhaushaltsbetrachtungen bei Oberflächenabdichtungen und Oberflächenabdeckungen. - In: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten - Abdichtung oder Abdeckung?, Schr. Angew. Geol., Bd. 37, Karlsruhe.
- /45/ FLÜGGE, F. (1999): Perspektiven für den Einsatz von GTD durch die Verwendung von Calcium-Bentonit. In: 4. Sächsisches Bautextilien-Symposium BAUTEX 2000 Chemnitz (Tagungsband).
- /46/ FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG, LANDSCHAFTSBAU E.V. (FLL), Bonn (1998): Regel-Saatgut-Mischung.
- /47/ GEBISSA, A.; QUNADT, T. & RISSE, J. (1997): Zugfestigkeit und temperaturabhängiges Rissverhalten mineralischer Dichtungsmaterialien. In: 13. Nürnberger Deponieseminar, Heft 76, Eigenverlag LGA, S. 187-201, Nürnberg.
- /48/ GESETZ ZUM SCHUTZ DES BODENS (BBodSchG, 1998): BGBl I Nr. 16, S. 502 – 510.
- /49/ GESETZ ZUR FÖRDERUNG DER KREISLAUFWIRTSCHAFT UND SICHERUNG DER UMWELTVERTRÄGLICHEN BESEITIGUNG VON ABFÄLLEN (KRW-/ABFG, 1994): BGBl. I S. 2705.
- /50/ HAAS, H. (1994): Asphalt dichtungen. - In: Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und in der Altlastensicherung, Schr. Angew. Geol., Bd. 30, Karlsruhe.
- /51/ HAAS, H. (1995): Deponieoberflächendichtungen aus Asphalt. - In: Oberflächenabdichtungen nach TA Siedlungsabfall - Überzogene Anforderungen oder ökologische Notwendigkeit? - Einsparungspotentiale durch Alternativen, IGB-Deponieseminar 1995, Hamburg.
- /52/ HÄHNE, R. (1998): Anmerkungen zum Vergleich HELP - BOWAHALD, unveröffentlicht.
- /53/ HÄMMERLE, E. & LOTTNER, U. (1997): Ergebnisse der Aufgrabungen mineralischer Oberflächenabdichtungen. - In: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten Planung - Bau - Kosten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 103, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- /54/ HÄMMERLE, E. (1997): Ergebnisse der Aufgrabungen mineralischer Oberflächenabdichtungen. In: Geotechnische Fragen beim Bau neuer und bei der Sicherung alter Deponien. 13. Nürnberger Deponieseminar, Heft 76, Eigenverlag LGA, S. 231-265, Nürnberg.
- /55/ HEERTEN, G. (1995): Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von geosynthetischen Tondichtungen in Deponieabdichtungssystemen. - In: Oberflächenabdichtungen nach TA Siedlungsabfall - Überzogene

Anforderungen oder ökologische Notwendigkeit? - Einsparungspotentiale durch Alternativen. IGB-Deponieseminar 1995, Hamburg.

- /56/ HEROLD, C. (1997): Besondere Aspekte bei der Zulassung von Bentonitmatten für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien der Deponieklasse I, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
- /57/ HOLZLÖHNER, U. (1996): Rechnerische Abschätzung der Austrocknungsgefährdung von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponieabdichtungssystemen. - In: Oberflächenabdichtung oder Oberflächenabdeckung? Regelwerke oder alternative Systeme? Schr. Angew. Geol., Bd. 45, Karlsruhe.
- /58/ HORN, A. (1988): Bentokies-Dichtungen. In: Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien. Veröffentlichung des LGA-Grundbauinstituts, Heft 51, Eigenverlag LGA, Nürnberg.
- /59/ HÜTTER, M. & REHLINGHAUS, B (1994): Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Deponien. - In: Geowissenschaften 12, S. 11-17.
- /60/ INGENIEURTECHNISCHER VERBAND FÜR ALTLASTEN (ITVA) (1997): ITVA-Arbeitshilfe Oberflächensicherung (Entwurf), Berlin.
- /61/ JASMUND, LAGALY (HRSG., 1993): Tonminerale und Tone. Steinkopf Verlag Darmstadt.
- /61/ KLÄRSCHLAMMVERORDNUNG (ABFKLÄRV, 1992): BGBl. I S. 912, geändert am 06.03.1997, BGBl. I S. 446.
- /62/ KOCH, D. (1994): Bentonitvergütete Abdichtungen. - In: Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und in der Altlastensicherung, Schr. Angew. Geol., Bd. 30, Karlsruhe.
- /63/ KOERNER, R. M.; CARSON, D. A.; DANIEL, D. E. & BONAPARTE, R. (1996): Derzeitiger Stand der Testfelder mit Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTDen) in Cincinnati. - In: Oberflächenabdichtung oder Oberflächenabdeckung? Regelwerke oder alternative Systeme?, Schr. Angew. Geol., Bd. 45, Karlsruhe.
- /64/ KONOLD, W (1981): Anleitung zur Rekultivierung von Deponien, Teil 1, Veröffentlichung des Umweltbundesamtes.
- /65/ KONOLD, W. (1995): Anforderungen an die Rekultivierungsschicht beim Rekultivierungsziel Wald. - In: EGLOFFSTEIN, T. & BURKHARDT, G.: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten: Planung - Bau - Kosten, im Auftrag des Arbeitskreises Grundwasserschutz e. V. und der Überwachungsgemeinschaft Bauen für den Umweltschutz e. V., Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 103, S. 179 - 188.
- /66/ LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) (1997): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln. In: Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft (LAGA), Heft 20/1, Erich Schmidt Verlag.
- /67/ LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODEN / ABFALL (LABO / LAGA) (1995): Abfallverwertung auf devastierten Flächen. In: Bodenschutz, Heft 5.
- /68/ LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998): Bodenatlas des Freistaates Sachsen, Teil 2, Standortkundliche Verhältnisse und Bodennutzung.
- /69/ LANDESUMWELT NORDRHEIN-WESTFALEN (1998): Leistungsbuch Altlastensanierung & Flächenentwicklung. In: Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 5.
- /70/ LINERT, U. (1995): Verhalten von Pflanzenwurzeln in Oberflächenabdichtungssystemen. In: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten - Abdichtung oder Abdeckung?, Schr. Angew. Geol., Bd. 37, Karlsruhe.
- /71/ MALLWITZ, K. & SAVIDIS, S. A. (1996): Selbstheilungsvermögen bindiger Erdstoffe hinsichtlich Durchlässigkeit in Dichtungssystemen von Deponien. - In: Bautechnik 73, Heft 9, S. 614-623.
- /72/ MARKWARDT, N. (1990): Der Bodenwasserhaushalt in Deponieabdeckschichten, Diss., TU Berlin.

- /73/ MELCHIOR, S.; BERGER, K.; VIELHABER, B.; MIEHLICH, G. (1993): Ergebnisse der Langzeitüberwachung von Oberflächenabdichtungssystemen auf der Deponie Georgswerder (Hamburg), BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme, 2. Arbeitstagung.
- /74/ MELCHIOR, S.; BERGER, J.; VIELHABER, B. & MIEHLICH, G. (1994): Das Austrocknungsverhalten von mineralischen Oberflächenabdichtungen. - In: Oberflächenabdichtungssysteme für Deponien und Altlasten, Schr. Angew. Geol., Bd. 34, Karlsruhe.
- /75/ MELCHIOR, S.; STEINERT, B.; BURGER, K. & MIEHLICH, G. (1995): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. - In: Tagungsband BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen".
- /76/ MELCHIOR, S. (1998): Ansätze zur Gestaltung und Dimensionierung von Rekultivierungsschichten in Abdecksystemen für Deponien und Altlasten. In: Geforderte Maßnahmen bei der Stilllegung von Altdeponien - Kostentreibende Willkür oder Notwendigkeit ?, UTECH Berlin.
- /77/ MÜLLER, W. (1997): BAM-Zulassung für Kunststoffdichtungsbahnen und Schutzschichten. In: Müll und Abfall, Bd. 2.
- /78/ MÜLLER, W. & AUGUST, H. (1997): Stand der Umsetzung bei Oberflächenabdichtungen in Deutschland. In: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten, Planung - Bau - Kosten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 103, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- /79/ ODENSAß, M.; SCHROERS, S. & NIENHAUS, B. (1995): Kriterien für die Auswahl und den Einsatz von Oberflächenabdichtungen bei Altlasten. - In: altlasten spektrum 3/1995.
- /80/ PREUSCHMANN (1998): persönliche Mitteilung.
- /81/ PRÜFAMT FÜR GRUNDBAU, BODENMECHANIK UND FELSMECHANIK TU MÜNCHEN (1993): Der Einfluß von Frost-Tau-Wechsel auf das Sättigungs- und Durchlässigkeitsverhalten. Prüfzeugnis, München.
- /82/ REUTER, E. & KRUSE, B. (1996): Prüfung der Wirksamkeit geotextiler Tondichtungen durch Aufgrabungen. In: Oberflächenabdichtung oder Oberflächenabdeckung? Regelwerke oder alternative Systeme?. Schr. Angew. Geol., 45, Karlsruhe.
- /83/ REUTER, E.; LÜKEWILLE, W. & KRUSE, B. (1997): Wirksamkeitsvergleich von geosynthetischen Tondichtungsbahnen und mineralischen Tondichtungen, 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen.
- /84/ SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (SMU): Erlass zur Stilllegung von Deponien vom 09.05.1997.
- /85/ SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (SMU): Verwaltungsvorschrift über die bautechnische Prüfung von Anlagen zur oberirdischen Ablagerung von Abfällen vom 11.09.1996 (BauTechPrüfVwV-Dep).
- /86/ SAVIDIS, S.; MALLWITZ, K. & FRANKE, J. (1995): Selbstheilungsvermögen mineralischer Dichtmassen hinsichtlich Durchlässigkeit in gestörten Dichtschichten / Dichtsystemen an Deponien. In: Tagungsband BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen".
- /87/ SCHEFFER F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Aufl., Enke-Verlag, Stuttgart.
- /88/ SCHRAMM, M.; ECKART, M. & DUNGER, V. (1995): Abflussmodellierung für Halden. Studien-Statusbericht. HGC Hydro-Geo-Consult Freiberg GmbH.
- /89/ SCHROEDER, P. R.; DOZIER, T. S. ZAPPI, P. A.; MCENROE, B. M.; SJOSTROM, J. W. & R. L. PEYTON (1994): The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3, EPA/600/R-94/168b, U.S. Environmental Protection Agency office of Research and Development, Washington, DC.
- /90/ SCHROEDER, P. R.; AZIZ, N.M.; LLOYD, C.M.; ZAPPI, P. A. & K- BERGER (1998): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell: Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3 (mit Anpassung der

Dateneingabe an deutsche Verhältnisse). Erstellt am Inst. für Bodenkunde der Univ. Hamburg für den PT AWAS des BMBF im Umweltbundesamt.

- /91/ SCHWANECKE, W. & KOPP, D. (1996): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke im Freistaat Sachsen. - In: Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten Nr. 8.
- /92/ SCHWARZMÜLLER, H. & ROTH, J. (1997): Oberflächenabdichtung der Deponie Karlsruhe-West mittels erweiterter Kapillarsperre. - In: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten, Planung - Bau - Kosten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 103, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- /93/ STEFFEN, H. (1995): Gleichwertigkeit von Oberflächenabdichtungen aus Asphaltbeton. - In: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten - Abdichtung oder Abdeckung? Schr. Angew. Geol., Bd. 37, Karlsruhe.
- /94/ STEFFEN, H. & SCHIFFER, J. (1997): Asphaltdichtungen im Deponiebau. - In: Abfalljournal 4/97, S. 20-24.
- /95/ STEFFEN, H.; SCHIFFER, J.; HAHN, W. & BÖTTCHER, R.-D. (1997): Kombinationsdichtungen für ungewöhnlich steile Böschungen. - In: Entsorgungspraxis 7-8/97.
- /96/ STOCKMEYER, M. R. & MÜLLER, E. R. (1997): Praktische Erfahrungen mit Asphaltabdichtungen in der Schweiz. In: Geotechnische Fragen beim Bau neuer und bei der Sicherung alter Deponien. 13. Nürnberger Deponieseminar, Heft 76, Eigenverlag LGA, S. 64-79, Nürnberg.
- /97/ THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT (1994): Alternative Oberflächenabdichtungssysteme für Thüringer Altdeponien und Altablagerungen, Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Umwelt.
- /98/ URBAN-KISS, S. (1989): Auswahl und Optimierung geeigneter Oberflächenabdichtungssysteme gegen Regenwasserzutritte und Gasemissionen, BMFT-Verbundvorhaben "Neue Verfahren und Methoden zur Sicherung von Altlasten am Beispiel der Deponie Gerolsheim".
- /99/ VIELHABER, B. (1997): Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen - Feldversuche, Aufgrabungen, Berechnungen. - In: Geotechnische Fragen beim Bau neuer und bei der Sicherung alter Deponien. 13. Nürnberger Deponieseminar, Heft 76, Eigenverlag LGA, S. 269-286, Nürnberg.
- /100/ VON DER HUDE, N., KÄMPF, M. & MONTENEGRO, H. (1995): Kapillarsperren Stand der Forschung/Umsetzung in die Praxis. In: Oberflächenabdichtungssysteme im Deponiebau und in der Altlastensicherung, Schr. Angew. Geol., Bd. 37, Karlsruhe.
- /101/ VON DER HUDE & HOPPE, U. (1997): Konzeption und Durchführung eines Gleichwertigkeitsnachweises für alternative Dichtungssysteme, Workshop Die Kapillarsperre, Dresden.
- /102/ VON DER HUDE & MÖCKEL, S. (1997): Bau einer Kapillarsperre im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Breinermoor. Müll und Abfall, 11/1997.
- /103/ VON DER HUDE (1999): Wasserbaumitteilung, Heft 4.
- /103/ VON MAUBEUGE, K. & EHRENBERG, H. (1995): Geosynthetische Tondichtungsbahnen als Oberflächenabdichtung. - In: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten - Abdichtung oder Abdeckung? Schr. Angew. Geol., Bd. 37, Karlsruhe.
- /104/ WOHLRAB, B; ERNSTBERGER, H; MEUSER, A.; SOKOLLEK, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt, Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin.
- /105/ ZWEITE ALLGEMEINE VERWALTUNGSVORSCHRIFT ZUM ABFALLGESETZ (TA ABFALL, 1991): GMBI. S. 139, ber. S. 469.

5. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Oberflächenabdichtungssystem für Deponieklasse II
Abb. 2	Oberflächenabdichtungssystem für Deponieklasse I
Abb. 3	Aufbau der Kapillarsperre
Abb. 4	Aufbau des Systems mit Bentonitmatten (DK I)
Abb. 5	Aufbau der Asphaltbetonabdichtung
Abb. 6	möglicher Aufbau einer qualifizierten Abdeckung
Abb. 7	möglicher Aufbau einer temporären Abdeckung
Abb. 8	Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurven) der A-Horizonte von je einem Sand-, Schluff- und Tonboden, nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL et al. (1992)
Abb. 9	Überblick über die Modellstruktur von BOWAHALD 2-D (Anhang 13)

6. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Kornfraktionen des Bodens (nach DIN 4220)
Tabelle 2	Porenvolumen und Anteile der Porenklassen am Bodenvolumen nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992)
Tabelle 3	Abhängigkeit der Durchlässigkeit von Bodenart und Wassergehalt
Tabelle 4	Abhängigkeit der Wasserspeicherfähigkeit von der Bodenart
Tabelle 5	Wurzeltiefe einiger Pflanzenarten nach LINERT (1995) und KONOLD (1995)
Tabelle 6	Bodenarten nach DIN 18 915, Bl. 1
Tabelle 7	Zur Rekultivierung besonders geeignete Bodenarten
Tabelle 8	Nutzungsabhängige Bodenarten
Tabelle 9	Einbau der Böden in Abhängigkeit vom Feuchtezustand nach DIN 19 731

7. Begriffsbestimmungen

Blattflächenindex (LAI - Leaf Area Index)	Blattfläche der Vegetation in m^2 je m^2 überdeckte Bodenoberfläche
Bodenwasserhaushalt	zeitliche Änderung des Wassergehaltes im Boden, bedingt durch Aufnahme, Speicherung und Abgabe von Wasser
Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert)	hydraulische Leitfähigkeit, i. w. von Porengehalt und Körnung abhängiger Bodenparameter; Durchflussmenge je Flächeneinheit und Zeiteinheit (Filter-Geschwindigkeit) im wassergesättigten Boden, geteilt durch das Wasserspiegelgefälle
Evaporation	Verdunstung der Bodenoberfläche (Boden-, Schnee-, Eisverdunstung) und von freien Wasserflächen (Seeverdunstung unter Ausschluss biotischer Prozesse)
Evapotranspiration, potentielle (ETp)	Verdunstung von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Wasser, Rechengröße, die aus gemessenen meteorologischen Werten bestimmt wird; Summe aus potentiell möglicher Evaporation, Transpiration und Interzeptionsverdunstung
Evapotranspiration reale (ETa)	Verdunstung von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und begrenztem Wassernachschub, Summe von realer Evaporation, Transpiration und Interzeptionsverdunstung
Feldkapazität (FK) (Speicherfeuchte)	max. Wassermenge, die ein natürlich gelagerter Boden mit freiem Wasserabzug entgegen der Schwerkraft zurückhalten kann; konventionell der Wassergehalt bei einer Saugspannung von $pF\ 1,8$
Feuchteziffer	Wassergehalt [Vol-%] / Festsubstanzvolumen
Interflow	Zwischenabfluss, oberflächennaher Abfluss (Wasser, das auf Grund von Schichtungen im Boden $\pm$ hangparallel im Boden abfließt und an anderer Stelle wieder austritt, ohne die Grundwasseroberfläche zu erreichen)
Interzeptionsverdunstung	Verdunstung von Niederschlagswasser, das an der Pflanzenoberfläche zurückgehalten wurde (kann unter günstigen Voraussetzungen 40-50% des Niederschlages erreichen)
Kapillarwasser	der Anteil des gegen die Schwerkraft im Boden gehaltenen Wassers, der durch Menisken gehalten wird
Leguminosen	Stickstofffixierende Pflanzen

Makroporen	Risse und Röhren im Boden (Makroporen sind mikroskopisch erkennbar und Teil des Grobporenvolumens im Boden, Makroporen können in bindigen Böden von großer Bedeutung für die vertikale Wasser- und Stoffbewegung sein)
nutzbare Feldkapazität (nFK)	Wassermenge, die mit Saugspannungen zwischen pF 1,8 und 4,2 im Boden festgehalten wird, pflanzenverfügbares Wasser (Feldkapazität abzüglich Totwasseranteil)
nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFK _{ew})	nutzbare Wassermenge im Boden, bezogen auf die effektive Wurzeltiefe
Permanenter Welkepunkt	Grenzwert der Wasserspannung im Boden, bei dessen Erreichen Pflanzen irreversibel zu welken beginnen, konventionell einer Saugspannung von pF > 4,2
pF	Maß für die Saugspannung des Wassers (logarithmischer Wert)
Porenziffer	Porenvolumen / Festsubstanzvolumen
Saugspannung (Wasserspannung, Wasserbindung)	Spannung, mit der Wasser (z. B. im Boden) gebunden ist
Tiefensickerung	Grundwasserneubildung (v.a. Okt. - März), Absickerung von Wasser bis zur Grundwasseroberfläche
Totwasser	Wasser, das vom Boden mit höheren Saugspannungen gehalten wird, als sich die Pflanzenwurzeln entwickeln können, konventionell mit Saugspannungen > 4,2
Transpiration	Verdunstung von Wasser aus der Oberfläche von Pflanzen, welches im wesentlichen über Wurzeln aus dem Boden aufgenommen wurde
Wasserhaushalt	Elemente: -Niederschlag -Verdunstung -Abfluss
Wasserleitfähigkeit / Wasserdurchlässigkeit	gesättigte Wasserleitfähigkeit: Durchflussmenge je Flächen- und Zeiteinheit bei wassergesättigten Verhältnissen, bezogen auf das Wasserspiegelgefälle (gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) ungesättigte Wasserleitfähigkeit: Durchflussmenge je Flächen- und Zeiteinheit bei ungesättigten Zustand, bezogen auf eine definierte mittlere Saugspannung

8. Abkürzungsverzeichnis

AK GWS	Arbeitskreis Grundwasserschutz
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BG	Bodengruppe
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DVS	Deutscher Verband für Schweißtechnik
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETa	Reale Evapotranspiration
ETp	Potentielle Evapotranspiration
FK	Feldkapazität
HELP	Hydrologic Evaluation of Landfill Performance
HMD	Hausmülldeponie
ITVA	Ingenieurtechnischer Verband Altlasten
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAI	Blattflächenindex
LKr	Landkreis
nFK	nutzbare Feldkapazität
nFKeW	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums
PWP	permanenter Welkepunkt

9. Verzeichnis Anhang

Anhang 1	Untersetzung der Kosten zur Oberflächensicherung [nach Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1998): Leistungshandbuch Altlastensanierung & Flächenentwicklung]
Anhang 2	Verteilung langjähriger Jahresmittel der Niederschlagsmengen (Quelle: Bodenatlas des FS Sachsen, Teil 2)
Anhang 3	Bodenarten: Erläuterung der Kurzzeichen, Anteile der einzelnen Korngrößenfraktionen und nutzbare Feldkapazität bei mittlerer Lagerungsdichte (nach AG BODEN 1994)
Anhang 4	Verwertung organischer Abfälle (Biokompost und Klärschlamm) für Rekultivierungsmaßnahmen
Anhang 5	Gräser für die Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981)
Anhang 6	Arten für die Gründüngung und Bodenverbesserung auf Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981) und BÖNECKE (1994)
Anhang 7	Saatmischungen zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981)
Anhang 8	Beispiele für Trocken- und Halbtrockenrasen, bearbeitet nach SCHUBERT et al. (1995)
Anhang 9	Sträucher zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981)
Anhang 10	Bäume zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien (Vorwaldarten) nach KONOLD (1981) und KONOLD (1995)
Anhang 11	Typische Waldgesellschaften Sachsens nach SCHWANECKE & KOPP (1996)
Anhang 12	Systemkurzbeschreibung HELP
Anhang 13	Systemkurzbeschreibung BOWAHALD
Anhang 14	Übersicht über die wesentlichen Elemente des Wasserhaushaltes

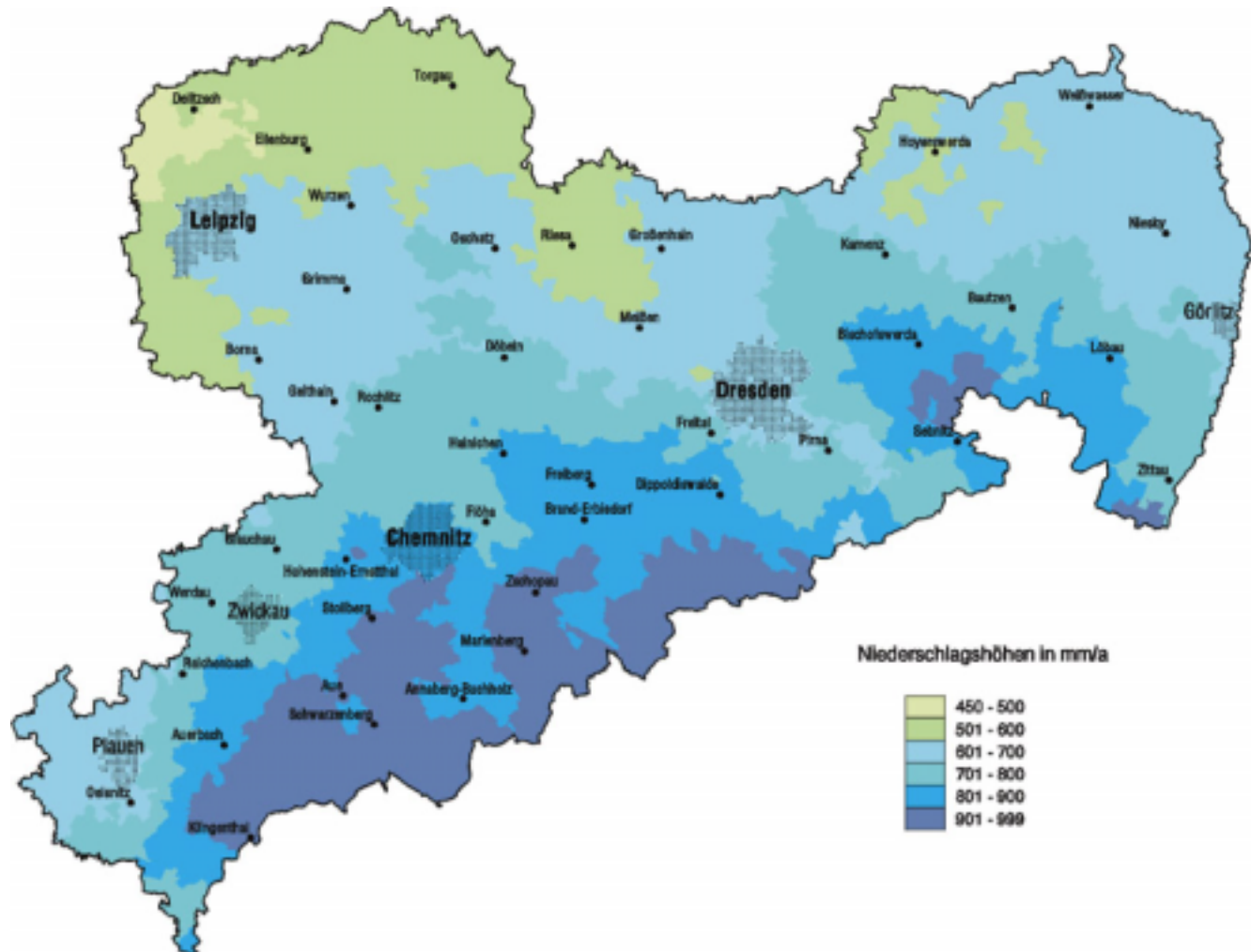
**Anhang 1 - Untersetzung der Kosten zur Oberflächensicherung
[nach Landesumweltamt Nordrhein – Westfalen (1998) :
Leistungsbuch Altlastensanierung & Flächenentwicklung,
geändert]**

Anhang 1

[illegible]

Anhang 2 - Verteilung langjähriger Jahresmittel der Niederschlagsmengen

(Quelle: Bodenatlas des FS Sachsen, Teil 2)



Anhang 3 - Bodenarten - Erläuterung der Kurzzeichen, Anteile der einzelnen Korngrößenfraktionen und nutzbare Feldkapazität bei mittlerer Lagerungsdichte (nach AG BODEN 1994)

Bodenartenuntergruppen	Kurzzeichen	Kornfraktionen [Masse-%]			Nutzbare Feldkapazität [Vol-%]
		Ton	Schluff	Sand	(pF 4,2 bis 1,8)
reiner Sand	sS	0-5	0-10	85-100	10,5
schwach schluffiger Sand	Su2	0-5	10-25	70-90	16
schwach lehmiger Sand	Sl2	5-8	10-25	67-85	17,5
mittel lehmiger Sand	Sl3	8-12	10-40	48-82	18
schwach toniger Sand	St2	5-17	0-10	73-95	14
mittel schluffiger Sand	Su3	0-8	25-40	52-75	20,5
stark schluffiger Sand	Su4	0-8	40-50	42-60	22
schluffig-lehmiger Sand	Slu	8-17	40-50	33-52	21
stark lehmiger Sand	Sl4	12-17	10-40	43-78	17
mittel toniger Sand	St3	17-25	0-15	60-83	15,5
schwach sandiger Lehm	Ls2	17-25	40-50	25-43	15,5
mittel sandiger Lehm	Ls3	17-25	30-40	35-53	15
stark sandiger Lehm	Ls4	17-25	15-30	45-68	16
schwach toniger Lehm	Lt2	25-35	30-50	15-45	15
sandig-toniger Lehm	Lts	25-45	15-30	25-60	13,5
stark sandiger Ton	Ts4	25-35	0-15	50-75	
mittel sandiger Ton	Ts3	35-45	0-15	40-65	
reiner Schluff	Uu	0-8	80-100	0-20	26
sandiger Schluff	Us	0-8	50-80	12-50	25,5
schwach toniger Schluff	Ut2	8-12	65-92	0-27	25
mitteltoniger Schluff	Ut3	12-17	65-88	0-23	23,5
sandig-lehmiger Schluff	Uls	8-17	50-65	18-42	22
stark toniger Schluff	Ut4	17-25	65-83	0-18	20,5
schluffiger Lehm	Lu	17-30	50-65	5-33	17
mittel toniger Lehm	Lt3	35-45	30-50	5-35	14
mittel schluffiger Ton	Tu3	30-45	30-65	0-20	15,5

stark schluffiger Ton	Tu4	25-35	65-75	0-10	16
schwach sandiger Ton	Ts2	45-65	0-15	20-55	14,5
lehmiger Ton	Tl	45-65	15-30	5-40	
schwach schluffiger Ton	Tu2	45-65	30-55	0-25	
reiner Ton	Tt	65-100	0-35	0-35	15

Anhang 4 - Verwertung organischer Abfälle (Biokompost bzw. Klärschlamm) für Rekultivierungsmaßnahmen

(nach LABO/LAGA-TR (1995): Abfallverwertung auf devastierten Flächen)

Maximal zulässige Stickstofffrachten (verfügbarer Anteil (kg N/ha)

einmalige Anwendung, im 1. Jahr verfügbarer Stickstoff, verfügbar sind

- 15% des organisch gebundenen Stickstoffs bei Biokompost
- 20% des organisch gebundenen Stickstoffs bei Klärschlamm

Einteilung der Nutzungsklassen

Nutzungskategorie	hydrogeologische	Standortverhältnisse	
	A	B	C
I	70	120	170
II	50	70	120
III	35	50	70
IV	20	35	50
V	0	20	35

I	Intensiv geführte Ackerkulturen, intensive Grünlandnutzung (Mehrschnitt-Wiesennutzung)
II	Intensive Grünlandnutzung (Weide), Flächen mit Einsaat von Gründüngungspflanzen
III	Extensive Grünlandnutzung, Grünflächen, Gehölzflächen mit Untersaaten
IV	Aufforstungen, Gehölzflächen ohne Untersaaten, Grünbrachen mit Einsaaten
V	Grünbrachen ohne Einsaat

Bewertung der Standortverhältnisse (A, B, C)

Zur Bewertung der Standortverhältnisse hinsichtlich des Nitrataustrages in das Grundwasser wird die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers bei nutzbarer Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKeW) innerhalb eines Jahres herangezogen.

		Austauschhäufigkeit [%]
A	(empfindliche Standorte)	> 200
B	(mäßig empfindliche Standorte)	100 - 200
C	(unempfindliche Standorte)	< 100

Maximal zulässige Frachten an Phosphat und Kalium (kg/ha; einmalige Anwendung)

Nutzungskategorie	Phosphat (P_2O_5)	Kalium (K_2O)
I	100	200
II	80	150
III	60	120
IV	40	80
V	20	40

Maximal zulässige Konzentrationen an Schwermetallen

	Biokompost [mg/kg Trockensubstanz]	Klärschlamm [mg/kg Trockensubstanz]
Blei	150	900
Cadmium	1,5	10
Chrom	100	900
Kupfer	100	800
Nickel	50	200
Quecksilber	1	8
Zink	400	2.500

Maximal zulässige Konzentration an organischen Schadstoffen im Klärschlamm (Trockensubstanz)

	Einheit	Wert
PCB 6 Kongenere nach Ballschmiter	mg/kg	0,2 pro Kongener
PCDD/F	ng I-Teq/kg	100

Für Kompost wurden keine Grenzwerte festgelegt.

Anhang 5 - Gräser für die Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981)

Gräser für die Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981) 1/2

Gräser für die Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981)

Art	Standortansprüche bzw. Toleranz bzgl. Wasserhaushalt	Bodenreaktion	Bodenart	Lebensdauer	Blattausdauer	Rohbodenbesiedler	Wurzelform und Wurzeltiefe	Saatmenge Reinsaat (kg/ha)	landschaftsbau. Eignung	Anwendbarkeit/Nutzung	Ausbreitungsstärke-art	Sonstige Bemerkungen
Rotschwingel (<i>Festuca rubra</i>)	indifferent	indifferent	L, T, Ts	ausdauernd	überwintert grün		ausläufer-treibend 50 cm	35	Untergras, früh austreibend	Dauerweiden Rasenanlagen	Rhizome, große Berasungsfähigkeit	gute Narbenbildung bei Mischung mit <i>F. ovina</i> , <i>Agrostis tenuis</i> ; zur Begrünung schwermetallsalzbelasteter Böden
Echter Schafschwingel (<i>Festuca ovina</i>)	trocken	sauer bis neutral	L, S, T, Ts	ausdauernd	sommergrün		Wurzelpilz 50 cm		Untergras, dichte Horste	Bodenfestigung, Rasenanlagen	dichteste Horste	Zeiger f. Verdichtung u. Tonverlagerung, langsame Entwicklung, guter Stand, dichte Feinwurzel, Pioniergras
Wiesenschwingel (<i>Festuca pratensis</i>)	frisch bis feucht	indifferent	Ls, L, T	ausdauernd	sommergrün		tief, intensiv	35	Obergras, früh austreibend	Wiesen, Feuchtwiesen	bildet kaum geschlossene Fläche lockere Horste	rasche Entwicklung, winterhart nicht für dürrgefährdete Standorte und Schattenstandorte
Rohrschwingel (<i>Festuca arundinacea</i>)	feucht	sauer bis schwach bas.	Ts, T	ausdauernd	überwintert grün	ja	tief		Obergras, früh und schnell austreibend	nasse, kalte Standorte	grobe Horste	auf wechselfeuchten, reichen, bindigen Böden
Rauhblattschwingel (<i>Festuca trachyphylla</i>)	trocken	schwach sauer	S	ausdauernd	überwintert grün	ja			Untergras			Ansaat an Böschungen, trockenresistent
Rotschwingel (<i>Festuca rubra commutata</i>)	trocken	stark sauer	S, Ls	ausdauernd	überwintert grün				Untergras horstbildend	Wiese, Weide, Rasen	kurze Ausläufer	Bodenfestiger, trockenheitsresistent, in höheren Lagen in Mischung mit <i>Agrostis tenuis</i> und <i>Festuca rubra</i>
Fiederzwenke (<i>Brachypodium pinnatum</i>)	trocken bis frisch	schwachsauer bis basisch	L, LÖB	ausdauernd	sommergrün	ja			Rhizomgras	Festlegung trockener Böschungen	Rhizomfilz	sicherer Zeiger für Calcium, kann durch Rhizomfilz junge Gehölzpflanzungen gefährden
Aufrechte Trespe (<i>Bromus erectus</i>)	trocken	neutral bis basisch	L, SL	ausdauernd	sommergrün	ja	intensiv 60 cm		dichte Horste	Wiesen, Rasen	hochwüchsiges Horstgras	
Knaulgras (<i>Dactylis glomerata</i>)	frisch bis feucht	indifferent	Ls, L, T	ausdauernd	sommergrün	ja		25 - 30	Obergras, früh austreibend	Wiese, Weide, Parkanlagen	nicht zur Rasenbildung geeignete Horste	wird durch Stickstoffgaben besonders gefördert blattreich, halmarm, rasch treibend
Deutsches Weidelgras (<i>Lolium perenne</i>)	frisch bis feucht	indifferent	Ls, Ts, L, T	ausdauernd	überwintert grün	ja	tief 120 cm	20 - 25	Untergras, stark bestockende Horste bildend	Dauerlandgras, Rasenanlagen	stark bestockende Horste	frostempfindlich, benötigt reichliche Stickstoffversorgung, raschwüchsig, Strapaziergras, nach Mahd kein dichter Bodenschluß
Glatthafer (<i>Arrhenatherum elatius</i>)	frisch bis feucht	schwachsauer bis basisch	Ls, L	ausdauernd	sommergrün	ja	tief, zäh bis 120 cm	40 - 60	Obergras, früh austreibend	Wiesen	lockere Horste	wenig empfindlich gg. Trockenheit, nicht auf nassen Standorten, rasche Entwicklung, benötigt reichliche Düngung
Wiesenrispengras (<i>Poa pratensis</i>)	frisch bis feucht	indifferent	Ls, L, Ts, T	ausdauernd	überwintert grün	ja	Kriechwurzel 60 cm	20 - 25	Untergras, dichte Rasenbildung	Dauergrasland, Rasenanlagen	kurze Rhizome	sehr anpassungsfähig, sehr gute Narbenbildung, Strapaziergras, erfordert häufigen Schnitt
Jähriges Rispengras (<i>Poa annua</i>)	frisch bis feucht	indifferent	Ls, L, Ts, T	annuell, ausdauernd	überwintert grün		flach		Untergras, sehr widerstandsfähig	Rasenanlagen, Strapaziergras	dauernde Selbstausaat	meidet dünne, magere u. stark saure Böden, durch dauernde Selbstausaat prakt. ausdauernd
Flechtstraußgras (<i>Agrostis stolonifera</i>)	frisch bis feucht	indifferent	Ls, L, Ts	ausdauernd	überwintert grün	ja	30 - 60 cm	20	Untergras	Daueranlagen, dort, wo hochwertige Arten versagen	Gras mit kurzen Rhizomen und langen Stolonen	narbenverfülzender Wuchs, geeignet zur Begrünung schwermetallsalzbelasteter Böden
Weiches Honiggras (<i>Holcus mollis</i>)	frisch bis feucht	indifferent	Ls, L, Ts, T	ausdauernd	überwintert grün		Humuswurzler u. Wurzelpilz		Obergras, früh austreibend	anspruchloses Schaffutter	bultige Horste, rasche Ausbreitung	schnee- u. spülfrostempfindlich, deutet auf kalte, nasse nährstoffarme Böden hin
Wiesenfuchsschwanz (<i>Alopecurus pratensis</i>)	frisch bis feucht	schwachsauer bis basisch	Ls, L, Ts	ausdauernd	überwintert grün			25	Obergras, früh austreibend	Dauerwiesen	Horste mit sehr kurzen Rhizomen	langsame, anfangs spärliche Entwicklung, in milden Wintern keine Wachstumsunterbrechung, Nährstoffresser
Quecke (<i>Agropyron repens</i>)	frisch	indifferent	Ls, L, Ts, T	ausdauernd	sommergrün	ja	Kriechwurzel 80 cm	60	Obergras, früh austreibend	Wiese, Weide, beschattete Rasenflächen	lange Rhizome	unempfindlich gegen Witterungsextreme u. Überstauung, geeignet zur Begrünung schwermetallsalzbelasteter Böden und von Böschungen
Drahtschmiele (<i>Avenia flexuosa</i>)	indifferent	sauer	L, Ls, SL	ausdauernd	immergrün		tief 100 cm		kleine, lockere Horste bildend	geringe Masseproduktion	kleine, lockere Horste	besonders geeignet für saure, nährstoffarme Böden, konkurrenzschwach auf besseren Böden
Ruchgras (<i>Anthoxanthum odoratum</i>)	indifferent	schwachsauer bis neutral	L, Ls, SL	ausdauernd	sommergrün		50 cm		Untergras, kleine blattarme Horste		geringer Nachwuchs	Besiedler schwach saurer, armer Böden, wird durch Düngung verdrängt

Gräser für die Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981) 2/2

Gräser für die Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981)

Art	Standortansprüche bzw. Toleranz bzgl. Wasserhaushalt	Bodenreaktion	Bodenart	Lebensdauer	Blattausdauer	Rohbodenbesiedler	Wurzelform Wurzeltiefe	Saatmenge Reinsaat [kg/ha]	landschafts- baul. Eignung	Anwendbarkeit/ Nutzung	Ausbreitungs- stärke/-art	Sonstige Bemerkungen
Rasenschmiele (<i>Deschampsia cespitosa</i>)	feucht	indifferent	Ls, L, Ts, T	aus- dauernd	sommer- grün		tief 100 cm		Obergras, früh ausbreitend Horste bildend	Weiden, Wiesen	grobe, erhabene Horste bildend, starker Nachwuchs	sehr anpassungsfähig, ohne spezifische Standortansprüche, meidet Rohhumus
Rohrglanzgras (<i>Phalaris arundinacea</i>)	Überschwem- mungszeiger	schwachsauer bis -basisch	Ts, T	aus- dauernd	sommer- grün	ja	tief, kriechend	16	1 - 2 m hohe Horste bildend		zahlreiche Lang- triebe u. Rhizome	langsame Entwicklung, Halmpflanzung
Pfeifengras (<i>Molinia caerulea</i>)	feucht	indifferent	Ls, L, Ts, T	aus- dauernd	sommer- grün		tief 100 cm		dichte Horste, 30 bis 200 cm hoch		hohes Horstgras	nach Aussaat langsame Entwicklung, bevorzugt wechselfeuchte, zeitweise vernässte Lagen mit zeitweiser oberfläch- licher Austrocknung, verträgt Sauerstoff- mangel u. hohe Al- und Mn-Konzentrat.
Gemeines Rispengras (<i>Poa trivialis</i>)	feucht	indifferent	Ls, Ts, L, T	aus- dauernd	überwintert grün				Untergras, guter Rasenbildner	Wiese, Weide, Parkanlagen	viele Stolonen im Nachwuchs	verträgt Überstauung, gefördert durch Stickstoffdüngung (Gülle, Jauche)
Platthalmrispe (<i>Poa compressa</i>)	trocken	basisch	Ls, L	aus- dauernd	überwintert grün	ja			Rhizomgras	Berasung trock. Böschungen	lockere Rasen bildend	auf trockensten Lagen, Calciumzeiger

Anhang 6 - Arten für die Gründüngung und Bodenverbesserung auf Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981) und Bönecke (1994)

Arten für die Gründüngung und Bodenverbesserung auf Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981) und Bönecke (1994)

Arten für die Gründüngung und Bodenverbesserung auf Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981) und BÖNECKE (1994)

Art	Standortansprüche bzw. Wasserhaushalt	Bodenreaktion	Bodenart	Lebensdauer	Blattausdauer	Rob.bodenbesiedler	Wurzelform Wurzeltiefe	Saatmenge Reinsaat [kg/ha]	landschafts- baul. Eignung	Anwendbarkeit/ Nutzung	Sonstige Bemerkungen
Rotklee (<i>Trifolium rubra</i>)	indifferent	indifferent	Ls, T, L	zweijährig	überwintert grün	ja	tief 80-200 cm	16 - 20	Bodenverbesserung	Gründüngung	Bodenverbesserung über hohen Anteil an organischen Rückständen
Weißklee (<i>Trifolium repens</i>)	indifferent	sauer bis basisch	Ls, T, L	ausdauernd	überwintert grün	ja	tief 80 cm	6 - 12	Erosionsschutz	Bienenweide, Gründüngung	auf verdichteten, tonigen Böden, bodenabschirmend, zur Begrünung schwermetall-salzbelasteter Böden geeignet
Feldklee (<i>Trifolium campestre</i>)	frisch bis feucht	indifferent	S, Ls, L	annuell	sommergrün	ja	intensiv		Begrünung magerer Böden	Gründüngung	Magerkeitszeiger, Pionierpflanze auf Sand- und Steingrubsböden, bevorzugt kalkarme Böden
Wundklee (<i>Anthyllis vulneraria</i>)	trocken bis frisch	sauer bis basisch	SL, Ls	ausdauernd	sommergrün	ja	Pfahlwurzel		Begrünung in winterkalten Lagen	Gründüngung	düngerfeindlich, unempfindlich gegen Dürre und Winterkälte, meidet stark saure Böden, tief- bis mittelgründige Lehm- u. Lößböden bevorzugt
Hornschotenklee (<i>Lotus corniculatus</i>)	frisch bis feucht	sauer bis basisch	Ls, L	ausdauernd	sommergrün	ja	Pfahlwurzel 100 cm	12 - 20	Bodenverbess. Erosionshemmung	Bienenweide, Gründüngung	bevorzugt Ca-haltige Böden, stark bestockend, böschungssichernd, zur Begrünung schwermetall-salzbelasteter Böden geeignet
Weißer Honigklee (<i>Melilotus alba</i>)	trocken	sauer bis basisch	Ls, L, T	zweijährig	sommergrün	ja	Pfahlwurzel 70 cm		Melioration	Gründüngung	massenwüchsig, dürreresistent, zur Melioration schwerer, verdichteter Böden
Hopfenluzerne (<i>Medicago lupulina</i>)	frisch bis feucht	sauer bis basisch	Ls, L	annuell	überwintert grün	ja	Flachwurzler 10-30 cm	18 - 24	Bodenverbess. Erosionshemmung	Gründüngung, Bienenweide	rasche Jugendentwicklung, bildet viele Faserwurzeln, erosionshemmend an Böschungen, bevorz. Ca-reiche Böden
Blaue Lupine (<i>Lupinus angustifolius</i>)	trocken bis frisch	schwach bis stark sauer	Ls, LS	annuell	sommergrün	ja	Pfahlwurzel 100-150 cm	200	Bodenverbess. Erosionshemmung	Gründüngung	bevorzugt Ca-freie, sandige Böden, sehr tiefgründige und intensive Durchwurzelung, schnell verholzend
Gelbe Lupine (<i>Lupinus luteus</i>)		schwach bis stark sauer	S, SL	annuell	sommergrün	ja	Pfahlwurzel >100 cm	160-180	Bodenverbesserung	Gründüngung	meidet Ca-haltige Böden, günstig zur Begrünung leichter, saurer Sandböden, massenwüchsig, tiefgründige und intensive Durchwurzelung, N-Sammler
Winterwicke (<i>Vicia villosa</i>)	frisch bis feucht	schwach bis stark sauer	S, SL, Ls	annuell	überwintert grün	ja	Pfahlwurzel 80 cm	5 - 20 nur in Gemengen	Erosionsschutz Herbssaat mögl.	Gründüngung	bevorzugt Ca-arme Böden, verträgt Ton- und andere schwere Böden, als Erosionsschutz in Herbssaat 200 kg/ha
Weißer Senf (<i>Sinapis alba</i>)	feucht bis trocken	neutral bis basisch	Ls, SL, L	annuell	sommergrün		Pfahlwurzel 80-150 cm	11 - 15	schnelle Begrünung	Gründüngung	wüchsige, kurzlebige, schnell beschattende Pflanze, sehr anspruchslos, wärmeliebend, bevorzugt Ca-haltige Böden
Stiermähre (<i>Stellaria media</i>)	trocken bis frisch	neutral	S, Ls, L	annuell	überwintert grün	ja	flach		Bodenfestiger		bevorzugt Lehm Böden, Stickstoffzeiger, hoher Deckungsgrad
Schafgarbe (<i>Achillea millefolium</i>)	trocken bis frisch	indifferent	Ls, L	ausdauernd	überwintert grün	ja	kriechend 90-400 cm		Bodenfestiger	Begrünung von schwermetall-salzbelasteten Böden	näskescheuend, Nährstoffzeiger

**Anhang 7 - Saatgutmischungen zur Begrünung von
Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981) (Angabe
der Saatgutmengen in kg/ha)**

**Saatgutmischungen zur Begrünung von Abtablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981),
Angabe der Saatgutmengen in kg/ha**

Art	Mischung 1 Trockenrasen auf Rohböden	Mischung 2 Trockenrasen auf silikatischen Rohböden	Mischung 3 Trockenrasen auf sandigen Rohböden	Mischung 4 auf silikatischem, sandigem Material	Mischung 5 auf trockenen Sanden und Kiesen	(Mischung 6) schwermetall- belastete Böden	Mischung 7 mittlere bis schwere, trockene Böden	Mischung 8 feuchte Lagen NS>800 mm
Schafgarbe (<i>Achillea millefolium</i>)	1	1	1	20		10		
Quecke (<i>Agropyron repens</i>)						60		
Rotstraußgras (<i>Agrostis tenuis</i>)	10	10	10	50	5	20	10	
Ruchgras (<i>Anthoxanthum odoratum</i>)		3		10				
Wundklee (<i>Anthyllis vulneraria</i>)	3							
Drahtschmiele (<i>Avenella flexuosa</i>)		6		30				
Fiederzwenke (<i>Brachypodium pinnatum</i>)	10							
Aufrechte Trespe (<i>Bromus erectus</i>)	10							
Schafschwingel (<i>Festuca ovina</i>)	30	40	45	60	20		40	
Rotschwingel (<i>Festuca rubra</i>)	20	10	20	20	15	45		
Rotschwingel (<i>Festuca rubra commutata</i>)		20					20	
Rotschwingel (<i>Festuca rubra rubra</i>)					15		20	
Festuca trachyphylla (Rauhblattschwingel)			5					
Weiches Honiggras (<i>Holcus mollis</i>)				10				
Deutsches Weidelgras (<i>Lolium perenne</i>)						70		
Hornschotenklee (<i>Lotus corniculatus</i>)	2	2	2			20		
Hopfenluzerne (<i>Medicago lupulina</i>)	2	1	1		5			6
Wiesenlieschgras (<i>Phleum pratense</i>)								4
Platthalmrispe (<i>Poa compressa</i>)			2					
Wiesenrispe (<i>Poa pratensis</i>)		3					10	5
Wiesensalbei (<i>Salvia pratensis</i>)	2							
Weißklee (<i>Trifolium repens</i>)		1	1			30		4
Art	Mischung 9 sehr tonige Böden	Mischung 10 Wiesen in frischen bis feuchten Lagen	Mischung 11 Wiesen in frischen bis trockenen Lagen	Mischung 12 Wiesen in rauen Mittel- gebirgslagen	Mischung 13 Wiesen in rauen Mittel- gebirgslagen Nd>800 mm	Mischung 14 Bodenauf- schluß; große Wurzel- masse	Mischung 15 Bodenauf- schluß; große Wurzel- masse	
Glatthafer (<i>Arrhenatherum elatius</i>)			5					
Knaulgras (<i>Dactylis glomerata</i>)			4	4				
Wiesenschwingel (<i>Festuca pratensis</i>)		18	12	16	14			
Rotschwingel (<i>Festuca rubra</i>)		3	5	4	3			
Deutsches Weidelgras (<i>Lolium perenne</i>)					3			
Hopfenluzerne (<i>Medicago lupulina</i>)							12	
Wiesenlieschgras (<i>Phleum pratense</i>)		6	3	6	5			
Wiesenrispe (<i>Poa pratensis</i>)		3	3	3	3			
Gemeine Rispe (<i>Poa trivialis</i>)								
Weißer Senf (<i>Sinapis alba</i>)	15							
Schwedenklee (<i>Trifolium hybridum</i>)						4		
Rotklee (<i>Trifolium pratense</i>)	20-22					12		
Weißklee (<i>Trifolium repens</i>)		3	3	3	2	5	6	
Art	Mischung 16 Böschungsbegrünung trockener, sehr saurer Sandböden	Mischung 17 Böschungsbegrünung leichter, sehr saurer, feuchter Sandböden	Mischung 18 Böschungsbegrünung neutraler, kalk- reicher, trockener Sandböden warmer Lagen	Mischung 19 Böschungsbegrünung mittlerer bis schwerer, trockener Böden	Mischung 20 Böschungsbegrünung mittlerer bis schwerer, frischer bis feuchter Böden	Mischung 21 Böschungsbegrünung mittlerer bis schwerer, nasser Böden	Mischung 22 flachgründige, saure, frische bis feuchte Böden	Mischung 23 flachgründige, kalkreiche, trockene Böden
Schafgarbe (<i>Achillea millefolium</i>)			5					
Agrostis canina		5				5		
Weißstraußgras (<i>Agrostis gigantea</i>)					5	5		
Flechtstraußgras (<i>Agrostis stolonifera</i>)		10			5			
Rotstraußgras (<i>Agrostis tenuis</i>)	10		10	10			10	10
Drahtschmiele (<i>Avenella flexuosa</i>)							20	
Fiederzwenke (<i>Brachypodium pinnatum</i>)								20
Aufrechte Trespe (<i>Bromus erectus</i>)								20
Weiche Trespe (<i>Bromus mollis</i>)			10					
Schafschwingel (<i>Festuca ovina</i>)	40	20	30	40		30	40	40
Rotschwingel (<i>Festuca rubra</i>)	20	30	20	20	40	30	20	20
Platthalmrispe (<i>Poa compressa</i>)								10
Wiesenrispe (<i>Poa pratensis</i>)	10	10	10	10	20	10	20	10
Gemeine Rispe (<i>Poa trivialis</i>)		10			5	5		

Anhang 8 - Beispiele für Trocken- und Halbtrockenrasen, bearbeitet nach SCHUBERT et al. (1995)

Gesellschaft	Feldschicht
Silbergras-Pionierfluren (offene Pionierfluren lockerer Sandböden, und sommertrockener Grusböden auf Porphyr- und Kreidesandsteinverwitterungen - Trockenrasen)	Silbergras (<i>Cornephorus canescens</i>) Schmalblättriger Sauerampfer (<i>Rumex tenuifolius</i>) Bauernsenf (<i>Teesdalia nudicaulis</i>) Frühlingsspark (<i>Spergula morisonii</i>) Rot-Straußgras (<i>Agrostis capillaris</i>) Frauenhaarmoos (<i>Polytrichum piliferum</i>) Hornzahnmoos (<i>Ceradoton purpureus</i>) Becherflechten (<i>Cladonia</i> ssp.)
Kontinentale Trocken- und Halbtrockenrasen (Rasengesellschaften auf basischen Verwitterungsböden mit höheren Feinerdeanteile, exponierte Standorte, in Sachsen i. d. R. nur durch Pflege zu erhalten)	Walliser Schwingel (<i>Festuca valesiaca</i>) Furchenschwingel (<i>Festuca rupicola</i>) Sandfingerkraut (<i>Potentilla arenaria</i>) Steppenlieschgras (<i>Phleum phleoides</i>) Rispen-Flockenblume (<i>Centaurea stoebe</i>) Skabiose-Arten (<i>Scabiosa</i> ssp.) Ähren-Blauweiderich (<i>Pseudolysimachium spicatum</i>)
Basiphile Trocken- und Halbtrockenrasen (Gesellschaften basenreicher Standorte in niederschlagsarmen, kontinental geprägten Klimabereichen des Flach- und Hügellandes, i. d. R. nur durch Pflege vor Wiederbewaldung zu schützen)	Echtes Labkraut (<i>Galium verum</i>) Zwergsegge (<i>Carex humilis</i>) leine Pimpinelle (<i>Pimpinella saxifraga</i>) Hügelmeier (<i>Asperula cynanchica</i>) Trifthafer (<i>Avenula pratensis</i>) Zypressen-Wolfsmilch (<i>Euphorbia cyparissias</i>) Karthäusernelke (<i>Dianthus carthusianorum</i>) Kleiner Wiesenknopf (<i>Sanguisorba minor</i>) Wiesensalbei (<i>Salvia pratensis</i>)
Kontinentale Halbtrockenrasen (Gesellschaften basenreicherer, mäßig tief verwitterter, teilweise lößbedeckter Böden, nur durch Pflege vor der Wiederbewaldung mit wärmeliebenden Gehölzgesellschaften zu schützen)	Fiederzwenke (<i>Brachypodium pinnatum</i>) Stengellose Kratzdistel (<i>Cirsium acaule</i>) Knackelbeere (<i>Fragaria viridis</i>) Großblütige Braunelle (<i>Prunella grandiflora</i>) Frühlings-Adonisröschen (<i>Adonis vernalis</i>) Mittlerer Wegerich (<i>Plantago media</i>)

Fingerkrautarten (<i>Potentilla</i> spp.)
Sichelluzerne (<i>Medicago falcata</i>)

Anhang 9 - Sträucher zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981)

Sträucher zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981) 1/2

Sträucher zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981)

Art	Standortansprüche bzw. Toleranz bzgl. Wasserhaushalt	Bodenreaktion	Bodenart	Blattausdauer	Robbodesiedler	Wurzelform Wurzeltiefe	Ausbringung als	landschaftsbauliche Eignung	Rauchhärte, Wildverbiß u.a.	Sonstige Bemerkungen
Hundsrose (Rosa canina)	trocken bis feucht	indifferent	Ls, SL, L	sommergrün	ja	tief	Sämling, Busch	sehr gute Befestigung steiler Böschungen in Südlagen, Kies-/Sandgruben, Halden	kaum Wildverbiß	schnellwüchsig, winterhart, auf Ca-haltigen oder basischen, warmen Böden beste Wachstumsleistungen
Weinrose (Rosa eglanteria)	trocken	basisch	Ts, Ls, L	sommergrün	ja	tief	Sämling, Busch	geeignet zur Haldenbegrünung	industriefest	Ansprüche und Eigenschaften wie Rosa canina
Ribernellrose (Rosa spinosissima)	trocken	neutral bis basisch	L	sommergrün	ja		Sämling, Busch	Befestigung von Böschungen und Rohböden	unempfindlich gegen Winddruck und Sandschiff	bevorzugt Wassermangelböden, ausläuftreibend, sonst ähnliche Ansprüche wie Rosa canina
Kartoffelrose (Rosa rugosa)	indifferent	indifferent	S, SL, Ls	sommergrün			Sämling, Busch	Befestigung von Böschungen und Rohböden	kein Wildverbiß, klimahart	verträgt auch leicht saure Böden, anspruchslos
Eingrifflicher Weißdorn (Crataegus monogyna)	trocken bis frisch	basisch	Ls, L, T	sommergrün		tief	Sämling, Busch	Befestigung von Roh- u. Sandböden, Haldenbegrünung	wenig empfindlich gegen Rauchsäuren und -gase, kein Wildverbiß	winterhart, sehr ausschlagsfähig, anspruchslos, verträgt hohe Lufttrockenheit nicht in direkter Nähe zu Obstanlagen (Brutstätte für Obstbaumschädlinge)
Wolliger Schneeball (Viburnum lantana)	trocken bis frisch	basisch	Ts, T, L	überwintert grün		flach, intensiv	Sämling, Busch		industriefest, kein Wildverbiß	raschwüchsig, starkes Stockausschlagsvermögen, nicht auf zu trockenen Böden
Wasserschneeball (Viburnum opulus)	feucht	schwach sauer bis basisch	Ts, T, L	sommergrün		flach, intensiv	Sämling, Busch	Haldenbegrünung	kein Wildverbiß	raschwüchsig, starkes Stockausschlagsvermögen, nicht auf zu trockenen Böden
Kreuzdorn (Rhamnus cathartica)	trocken bis frisch	basisch	Stein- und Kiesböden	sommergrün	ja		Sämling, Busch	besonders zur Befestigung von Rohböden	geringer Wildverbiß	langsam wachsend, geringer Stockausschlag, verträgt zeitweise Dürre
Sanddorn (Hippophae rhamnoides)	wechsel-feucht	basisch	Stein- und Kiesböden	immergrün	ja	tief 120 cm	Sämling, Busch	Befestigung von Sand- u. Kiesböden, Halden	häufig vom Wild verbißen	empfindlich gegen Wassermangel und schlechte Bodendurchlüftung, verträgt salzhaltige Böden, Ca-liebend, nachlassende Wachstumsleistung auf humusreicheren Böden
Hasel (Corylus avellana)	indifferent	indifferent	Steinböden L	sommergrün	ja		Sämling, Busch	Bodenbefestigung Bodenverbesserung	empfindlich in rauchgefährdeten Lagen	starker Stockausschlag, hohes Lichtbedürfnis, durch schnellverrotendes Laub bodenverbessernd
Liguster (Ligustrum vulgare)	indifferent	basisch	Ls, T	immergrün	ja	intensiv	Steckling, Busch	Bodenbefestigung Haldenbegrünung	wenig rauchempfindlich, hohe Windfestigkeit	schnellwüchsig, verlangt alkalische Bodenreaktion
Schlehe (Prunus spinosa)	indifferent	indifferent	L, steinige Leimböden	sommergrün	ja	flach, Ausläufer treibend	Sämling, Busch	Befestigung v. Böschungen und trockenen Hängen	Rinde wird häufig vom Wild verbißen	langsam wachsend, winter- u. windhart, bevorz. auf sonnigen, warmen und trockenen Standorten
Vogelbeere (Sorbus aucuparia)	indifferent	indifferent	Ls, L, steinige Leimböden	sommergrün	ja	tief	Sämling, Heister	Bodenverbesserung Humusbildner auf Odland u. Schutthalde	mäßig rauchhart, wenig empfindlich gegen Gase, wildverbißgefährdet	raschwüchsig in der Jugend, winterhart, unempfindlich gegen Spätfrost und Staunässe, Bodenvorbereitung für wertvollere Hölzer
Faulbaum (Frangula alnus)		stark sauer	Ls, L, T	sommergrün			Sämling, Busch		wenig rauchempfindlich, kein Wildverbiß	raschwüchsig, starkes Stockausschlagsvermögen, stark wasserzehrend
Roter Holunder (Sambucus racemosa)	frisch	schwach sauer	L, steinige Leimböden	sommergrün		intensiv	Sämling, Busch	zur Festlegung von Rohböden	rauchfest	meidet Ca-haltige Böden
Schwarzer Holunder (Sambucus nigra)	frisch	indifferent	Ts, T, L	sommergrün	ja	flach	Sämling, Busch	Begrünung v. Schlacken- und Schutthalde	unempfindlich gg. Rauchsäuren und Rauchgase, verträgt Starkwinde	raschwüchsig, sehr ausschlagsfähig, N-liebendes Gehölz
Roter Hartriegel (Cornus sanguinea)	indifferent	basisch	Ts, T, L	sommergrün	ja	Wurzel- ausläufer	Sämling, Busch	Begrünung von Trümmerflächen, Bodenbefestigung	unempfindlich gg. Rauchsäuren und Rauchgase, kein Wildverbiß	langsam wachsend, sehr reichliche Stockausschläge, winterhart; auf kräftigen, frischen bis feuchten, lockeren, alkalischen Böden, empfindlich gegen Früh- u. Spätfrost
Rote Heckenkirsche (Lonicera xylosteum)	frisch	schwach sauer bis basisch	Ls, L, T	sommergrün		flach	Sämling, Busch, Steckling		unempfindlich gg. Rauchsäuren, kein Wildverbiß	Feuchtigkeitsansprüche sinken mit zunehmendem Ca-Gehalt, nicht in Kirschanbaugebiete
Pfaffenbütschen (Euonymus europaeus)	frisch	schwach sauer bis basisch	Ls, Ts, L, T	sommergrün		dichtes Wurzelwerk	Sämling, Busch			Ca-reiche Böden bevorzugt, großes Ausschlagsvermögen, Wirt für Schwarze Rüben- und Bohnenlaus
Salweide (Salix caprea)	frisch bis feucht	schwach sauer bis basisch	Ls, L	sommergrün	ja		Steckling, Busch	Bodenverbesserung zur Bepflanzung von humusarmer Rohböden	rauchfest	unempfindlich gegen Graswuchs, erschließt und durchwurzelt auch tonige Böden, Bodenbefestigung

Sträucher zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach Konold (1981) 2/2

Sträucher zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien nach KONOLD (1981)

Art	Standortansprüche bzw. Toleranz bzgl.			Blattausdauer	Robbodesiedler	Wurzelform Wurzeltiefe	Ausbringung als	landschaftsbauliche Eignung	Rauchhärte, Wildverbiß u.a.	Sonstige Bemerkungen
	Wasserhaushalt	Bodenreaktion	Bodenart							
Grauweide (Salix cinerea)	wechselsaß	schwach sauer	S, T	sommergrün	ja		Steckling, Busch	Befestigung von armen u. feuchten Rohböden	rauchfest	winterhart, auf sicker- und staunassen Böden wachsend
Purpurweide (Salix purpurea)	indifferent	schwach basisch	S, Schlick	sommergrün	ja		Steckling, Busch	Lebendverbau von Böschungen zusammen mit S. cinerea	rauchfest	größte ökologische Amplitude aller Weidenarten, dürre-resistent, langsam wachsend, verträgt auch kiesige, steinige, trockene Böden, Bodenbefestigung
Kornelkirsche (Cornus mas)	indifferent	basisch	L, steinige Lehmböden	sommergrün		dichte Faser- wurzeln	Sämling, Busch	Begrünung von Bauschutt, Bodenbefestigung	empfindlich gegen Rauchsauren und Rauchgase kein Wildverbiß	sehr langsam wachsend, sehr großes Ausschlagsvermögen, winterhart, mit steigender Trockenheit steigt Anspruch an Ca-Gehalt, benötigt alkalische Bodenreaktion

Anhang 10 - Bäume zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien (Vorwaldarten) nach Konold (1995) und Konold (1995)

Bäume zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien (Vorwaldarten) nach Konold (1995) und Konold (1995)

Bäume zur Begrünung von Altablagerungen und Deponien (Vorwaldarten) nach KONOLD (1995) und KONOLD (1995)

Art	Standortansprüche bzw. Toleranz bzgl. Wasserhaushalt	Bodenreaktion	Bodenart	Rob-boden-besiedler	Wurzelform Wurzeltiefe	Licht-bedarf	Ausbrin-gung als	landschaftsbauliche Eignung	Rauchhärte, Wildverbiß u.a.	Sonstige Bemerkungen
Sommerlinde (Tilia platyphyllos)	frisch bis feucht	schwach sauer bis basisch	Ls, SL, L		tief	Schatten-pflanze	Sämling, Heister	Bodenverbesserung durch Laub	empfindlich gg. Rauchsäuren, Gase, Wildverbiß	empfindlich gegen Trockenheit und Hitze, mit steigendem Ca-Gehalt sinkt Wasserbed., schnell verrottendes Laub wirkt bodenverbessernd
Spitzahorn (Acer platanoides)	frisch bis feucht	indifferent	L, LS, S	ja	Herzwurzel tief	Halbschatten-pflanze	Sämling, Heister	Bodenverbesserung durch Laub, Bepflanzung von Böschungen	empfindlich gg. Rauchsäuren, Gase, Wildverbiß	anspruchsvoll gegenüber Nährstoffgehalt des Bodens, empfindlich gegen Graswuchs, Laub wirkt bodenverbessernd, stark wasserzehrend
Mehlbeere (Sorbus aria)	frisch bis feucht	schwach sauer bis basisch	S, steinige Böden		tief	Licht- bis Halbschatten-pflanze	Heister	Bepflanzung von trockenen Hängen mit kalkreichen Böden	empfindlich gg. Rauchsäuren, Wildverbiß, staubfest	wind- und winterhart, sehr starke Pumpwirkung
Feldulme (Ulmus minor)	wechsel-feucht	schwach sauer bis basisch	Ts, T	ja	tief	Lichtholzart	Sämling, Heister	Befestigung von trockenen Steilhängen u. Erosionsrinnen	empfindlich gg. Rauchsäuren und Gase	frosthart, sehr anspruchsvoll, längere Nässeperioden vertragend, Bestand durch Ulmensterben gefährdet
Esche (Fraxinus excelsior)	indifferent	schwach sauer bis basisch	Ts, LS, T	ja	Herzwurzel tief 150 cm	Halbschatten-pflanze	Sämling, Heister	Befestigung von Ca-haltigen Schlacken- u. Trümmerhalden	sehr empfindlich gegen Rauchsäuren u. Gase, starker Wildverbiß	verträgt Staunässe, empfindlich gegen saure Böden, in der Jugend empfindlich gegen Spätfrost und Kaltluft, stark wasserzehrend
Scheinakazie/Robinie (Robinia pseudoacacia)	frisch bis feucht	indifferent	S, Kies-böden	ja	Pfahlwurzel tief 300 cm	Licht- bis Halbschatten-pflanze	Sämling, Heister	Ersbesiedlung von lockeren Sand-, Kies- und Geröllböden, von Schutthalden und von Trümmerflächen	rauchfest industriefest verbilggefährdet	sehr gut hitze- und dürrverträglich, empfindlich gg. Früh- und Spätfrost, Laub wirkt bodenverbessernd, nicht in Nähe zu Pflaumenplantagen (Schildlausbefall), wasserzehrend
Schwarzpappel (Populus nigra)	wechselsnaß	schwach sauer bis basisch	Ls, SL, L	ja	intensiv 200 cm	Lichtholzart	Sämling, Heister	Bepflanzung von sandig-lehmigen und kiesigen Böden	rauchfest geringer Wildverbiß	anspruchsvoll, sehr empfindlich gegen Staunässe und saure Böden, Laub entfaltet sich relativ spät, stark wasserzehrend
Grauerle (Alnus incana)	wechselsnaß	schwach sauer bis basisch	Ts, T	ja	flach, weit 170 cm	Licht- bis Halbschatten-pflanze	Sämling, Heister	Befestigung von extremen Standorten, erosionshemmend	rauchfest geringer Wildverbiß	winterhart, Stickstoff-sammler, nicht auf sauren und ständig nassen Standorten, Laub wirkt bodenverbessernd
Schwarzlerle (Alnus glutinosa)	wechselsnaß	schwach sauer bis basisch	S, T	ja	tief, intensiv 170 cm	Licht- bis Halbschatten-pflanze	Sämling, Heister	Ersbesiedlung von sterilen Sandböden, wichtiges Bodenschutzgehölz	rauchfest geringer Wildverbiß	verträgt keine Ca-haltigen Standorte, sehr dürrerempfindlich in der Jugend, starkes Ausschlagsvermögen, stark wasserzehrend (wie A.incana)
Traubenkirsche (Prunus padus)	wechselsnaß	schwach sauer bis basisch	L, T		intensiv	Halbschatten-pflanze	Sämling, Busch	Befestigung von Ca-haltigen Schlacken- u. Trümmerhalden	rauchfest blitzgefährdet	nicht in Nähe zu Pflaumenplantagen und zu Ackerbaugeländen (starker Blattlausbefall)
Silberweide (Salix alba)	feucht	schwach sauer bis basisch	Ts, T	ja	dicht, fein 300 cm	Lichtholzart	Steckling, Busch	Bepflanzung von nassen und wechsel-nassen Standorten	rauchfest blitzgefährdet	empfindlich gegen Staunässe und verdichtete Böden, windunempfindlich, wichtiges Vogelschutzgehölz

Anhang 11 - Typische Waldgesellschaften Sachsens nach SCHWANECKE & KOPP (1996)

Nach SCHWANECKE & KOPP (1996) wird der Freistaat Sachsen in mehrere, durch Klima, Höhenlage und Böden charakterisierte forstliche Wuchsregionen gegliedert. Diese werden weiter in Wuchsgebiete unterteilt, die auf Grund der Standortbedingungen bestimmte Waldgesellschaften aufweisen.

Standortsregion	Wuchsgebiet	Gesellschaften
1. Tiefland	Mittleres Nordostdeutsches Altmoränenland	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen-Wald (teilweise mit Linde) auf den terrestrischen bis feuchteren Standorten - Kiefern-Eichen-Wälder auf den terrestrischen, ärmeren Standorten (reine Kiefernwälder nur auf Sandinseln) - Birken-Stieleichen-Wald und Hartholzauen (auf reicheren Böden) auf den vernässten Standorten
	Düben-Niederlaustitzer Altmoränenland	- Hainsimsen-Eichen-Buchen-Wälder auf besseren Standorten - Kiefern-Eichen-Wälder auf ärmeren Standorten - Birken-Stieleichen- und Erlenwälder in den Niederungen.
2. Hügelland	Sachsen-Anhaltinische Lößebene	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen-Wälder mit Linde, Feldulme und Esche - Hartholzau-Wälder
	Leipziger Sandlöß-Ebene	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen-Wälder - Hartholzau (im Bereich der Elsteraue) - im Gebiet ehemaliger Braunkohleförderung Orientierung an den dort vorhandenen Substraten
	Sächsisch-Thüringisches Lößhügelland	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichenwälder mit Linde auf feuchten bis mäßig trockenen Standorten - Hainsimsen Eichen-Buchenwälder auf den terrestrischen Standorten und auf

		Porphyrkuppen - Erlen-Eschen-Buchenwälder in einigen Tälern
	Erzgebirgsvorland	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen-Wälder - Hainsimsen-Eichen-Buchen-Wälder - montane (Tannen-Fichten)-Buchenwälder auf den Höhenzügen
	Westlausitzer Platte und Elbtalzone	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen- und Hainsimsen-Eichen-Buchen-Wälder auf den höheren Standorten mit besseren Böden - Kiefern-Eichen-Wälder auf ärmeren, sandigen Böden der Hänge - Hartholzau-Wälder entlang der Elbe
	Lausitzer Löß-Hügelland	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen-Wälder (besonders auf feuchteren Standorten) - submontane Hainsimsen-Eichen-Buchen-Wälder mit Fichte - Kiefern-Eichenwälder auf ärmeren, sandigen Standorten
3. Mittelgebirge	Vogtland	- Kiefern-Eichen-Wälder auf kühleren, niederschlagsärmeren, kontinental geprägten Standorten, z. T. mit Fichte - Hainsimsen-Eichen-Buchen-Wälder in den unteren Kammlagen und feuchteren Böden - Tannen-Fichten-Kiefern-Wälder mit Laubgehölzen in den mittleren Kammlagen
	Erzgebirge	- Hainsimsen-Eichen-Buchen-Wälder in den unteren Lagen, teilweise mit Fichte oder Kiefer - Hainsimsen-(Tannen-Fichten)-Buchen-Wälder in den mittleren Lagen, z.T. mit Kiefer auf kontinental geprägten Standorten - Wollreitgras-Fichtenwälder in den Kammlagen
	Elbsandsteingebirge	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen-Wälder mit Kiefer im Bereich des unteren Elbtales - Hainsimsen-Eichen-Buchen-Wälder auf den Ebenheiten - montane Fichten-Kiefern-Wälder in den

		Schluchten - Eichen-Birken-Wälder auf den ärmeren, sonnigeren Oberhängen - reiche Buchenwälder im Gebiet des Großen Winterberges (Basalt aus Ausgangsgestein den Bodenbildung)
	Oberlausitzer Bergland	- submontane, artenärmere Hainsimsen-Eichen- Buchen-Wälder in den unteren Lagen - Hainsimsen-(Tannen-Fichten)-Buchen-Wälder in den höheren Lagen - artenreiche Buchenwälder auf Basaltkuppen
	Zittauer Gebirge	- Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichen-Wälder in den unteren Berglagen - montane Hainsimsen-(Tannen-Fichten)-Buchen- Wälder in den höheren Berglagen auf reicheren Standorten - Kiefernwälder in den höheren Lagen auf ärmeren Sandstandorten - Buchen-Mischwälder auf Phonolitkuppen

Anhang 12 - Systemkurzbeschreibung zu HELP

HELP wurde von der US-Army Waterways Experiment Station für die US-Umweltbehörde Environmental Protection Agency (EPA) entwickelt, erschien in der ersten Version 1984 und liegt derzeit in der Version 3.07 (deutsche Anpassung) vor. Es ist ein quasi-zweidimensionales deterministisches, mit einem eintägigen Arbeitsschritt arbeitenden Modell zur Simulation des Wasserhaushaltes von Deponien / Altablagerungen. Für den Anwender steht das Handbuch von SCHROEDER et al. (1994) bzw. die deutsche Anpassung durch BERGER (1998) und Schroeder et al. (1998) zur Verfügung. Das Modell ist quasi-zweidimensional durch Kopplung mehrerer eindimensionaler Modelle - Perkolation und Verdunstung senkrecht, Oberflächen- und Dränschichtenabfluss waagerecht. Derzeit wird durch die Unterarbeitsgruppe 7 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) eine Empfehlung zum Thema "Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien" erarbeitet, die weitere Hinweise zu HELP liefern wird.

Anwendungsgebiete:

- Modellierung und Simulation des Wasserhaushaltes zur Abschätzung der Wasserhaushaltsgrößen Oberflächenabfluss, laterale Dränage, Evapotranspiration und Dichtschichtdurchsickerung für unterschiedliche Deponieaufbauten und klimatische Verhältnisse
- Vergleich der Wirksamkeit unterschiedlich aufgebauter Abdichtungssysteme, Abschätzung der langfristigen Wirksamkeit/Risiken älterer Systeme
- Optimierung einzelner Schichten.

Eingabeparameter:

- Klimadaten (Tageswerte für Niederschlag, monatliche Mittelwerte für Temperatur und Strahlungsintensität)
- Bodenkennwerte der einzelnen Schichten des geplanten Deponieabdichtungssystems (Durchlässigkeit, Gesamtporenvolumen, Wassergehalt bei Feldkapazität und permanenter Welkepunkt)
- Pflanzendaten (Blattflächenindex und Durchwurzelungstiefe)
- Angaben über Anzahl und Mächtigkeit der Bodenschichten, Länge und Neigung der Dränageschichten und die Fläche der zu berechnenden Deponie.

HELP erlaubt ohne Einschränkungen die Eingabe eines Deponieaufbaues nach TA Siedlungsabfall. Bei der Simulation von alternativen Abdichtungen sind die Möglichkeiten eingeschränkt, so dass die Modellierung von Kapillarsperren nicht möglich ist. Grundsätzlich können jedoch Ablagerungen ohne eine Oberflächenabdichtung oder -abdeckung modelliert werden.

Programmaufbau

Das Hauptmenü des Programms ist in 7 Untermenüs gegliedert, die die Eingabe der Eingangsdaten, die Durchführung der Modellierung und die Ausgabe der Ergebnisse ermöglichen:

1. Eingabe/Bearbeiten der Klimadaten

2. Eingabe/Bearbeiten der Bodenwerte und Daten für den Systemaufbau
3. Ausführung der Simulation
4. Darstellung der Ergebnisse
5. Druck der Ergebnisse
6. Benutzerhandbuch (Kurzversion)
7. Ende

Klimadaten

Die Klimadaten sind in vier Gruppen gegliedert. Es ist eine Eingabe der nachfolgend aufgeführten Werte notwendig.

- Evapotranspiration
 - Lage der Deponie (Breitengrad)
 - durchschnittliche Tiefe der Evapotranspirationszone in [cm]
 - Blattflächenindex
 - Beginn und Ende der Vegetationsperiode
 - Jahresmittel der Windgeschwindigkeit [km/h]
 - Vierteljährliches Mittel der Luftfeuchtigkeit [%]
- Niederschlag (Tagessummen der Niederschlagsmenge [mm])
 - Temperatur
 - Globalstrahlung (tägliche Strahlungssumme [MJ/m²])

Die notwendigen Daten können über den Deutschen Wetterdienst auf Datenträger gegen Entgelt bezogen werden:

Deutscher Wetterdienst
Zentrales Gutachtenbüro
Klima- und Umweltberatung
PF 10 04 65
63004 Offenbach
(Tagesdaten: Niederschlag, mittl. Lufttemperatur
Monatsmittelwerte: Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte)

Deutscher Wetterdienst
Zentrales Gutachtenbüro
Klima- und Umweltberatung
PF 65 01 50
22361 Hamburg
(Tagesdaten: Globalstrahlung)
Tel.: 069/8062-2990
Tel.: 040/60173-240

Daten für Böden und Systemaufbau

Die Eingabe der Daten zum Boden und zum Aufbau des Systems erfolgt über folgende Untermenüs:

Untermenü	Inhalt
generelle Informationen zu Projekt	- Name - Größe des zu modellierenden Gebietes - Anteil der Fläche, auf der lateraler Abfluss möglich ist - Anfangswassergehalte der Schichten
Daten zu den Schichten	- Schichttyp (Typ 1-4) - Schichtdicke - Bodentextur-Nummer (oder Angabe des Porenvolumens, der Feldkapazität, des permanenten Welkepunktes, des k_f-Wertes) - Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten (Direkteingabe oder Simulation durch HELP) - Höhe des unterirdischen Zuflusses zur Schicht - Maximale Dränlänge, Neigung in Prozent - Angaben über rezirkuliertes Wasser - Qualität der KDB (Herstellung und Verlegung)

Oberflächenabfluss

Der Oberflächenabfluss wird mit der Kurvennummern-Methode des US Soil Conservation Service - SCS-Methode berechnet, basierend auf Tageswerten für Niederschlag und Schneeschmelze. In die Kurvennummern-Methode (CN) gehen die Faktoren Bodenart, Bodennutzung, Vorregen und Jahreszeit ein.

Die Größen Vorregen und Jahreszeit werden in der Bodenfeuchtekategorie zusammengefasst (Klassen I bis III). Dabei wird unter Vorregen die Niederschlagssumme der dem betrachteten Ereignis vorangegangenen 5 Tage verstanden. Der Einfluss der Jahreszeit wird über die Festlegung der Vegetationsperiode erfasst. Des weiteren wird eine Zuordnung der Böden zu einem von 4 Bodentypen (Bodentyp A -großes Versickerungsvermögen, auch nach starker Vorbefeuchtung - bis D - sehr geringes Versickerungsvermögen, Tonböden) vorgenommen.

Anhand von Tabellenwerke können die CN-Werte für die einzelnen Bodenfeuchteklassen in Abhängigkeit von Bodentyp und Bodennutzung ermittelt werden. Für die Bodenfeuchtekategorie II sind die CN-Werte dem o. g. Merkblatt (DvWK,1984) zu entnehmen, die CN-Werte für die Bodenfeuchteklassen I und III sind über Diagramme bestimmbar.

Erläuterungen zu den Schichtdaten / Schichttyp

HELP verlangt die Zuordnung der Schichten zu einem bestimmten Schichttyp:

Typ 1 Perkolationsschichten	Typ 2 Dränageschichten	Typ 3 Bindige mineralische Dichtungsschicht	Typ 4 KDB
- Rekultivierungsschicht und Abfallkörper - Schichten mit mittlerer bis hoher Durchlässigkeit, die hauptsächlich abwärts gerichteten ungesättigten Abfluss aufweisen und denen durch Evapotranspiration Wasser entzogen werden kann - Schichten dürfen nicht von einer undurchlässigen Schicht mit Sickerwassersammel und -ableitungssystem unterlagert sein - dienen der Wasserspeicherung - Keine Modellierung lateraler Flüsse	- Schichten mit mittlerer bis hoher Durchlässigkeit, die mit einer Dichtschicht mit Sickerwassersammel und -ableitungssystem unterlegt sind - vertikaler Abfluss: als ungesättigter Abfluss modelliert - lateraler Abfluss als gesättigter Abfluss modelliert	- Schichten mit einer sehr geringen Durchlässigkeit - Schichten leiten nur vertikal im gesättigten Zustand	- Schichten, die vertikalen Abfluss verhindern und Durchsickerung limitieren - Durchsickerung dieser Schichten wird als Dampfdiffusion bzw. als Durchsickerung durch Herstellungs- und Installationsdefekte betrachtet

Übersicht über Modellierungsprozesse

HELP modelliert die hydrologischen Prozesse getrennt in zwei Kategorien:

1. Prozesse, die auf der Oberfläche ablaufen:

- Schneeschmelze
- Interzeption des Niederschlages durch die Vegetation
- oberflächlicher Abfluss Evaporation.

2. Prozesse, die unterirdisch ablaufen:

- Evaporation aus dem Bodenprofil
- Transpiration der Vegetation
- ungesättigter vertikaler Abfluss
- Perkolation in der mineralischen Dichtungsschicht
- Durchsickerungen durch die KDB
- gesättigter Abfluss

Durchsickerungen durch die mineralische Dichtungsschicht werden als gesättigter Abfluss nach Darcy modelliert. Nicht modelliert werden können Alterungs- und Austrocknungsprozesse der mineralischen Dichtung, eine Variation der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Zeit wird also nicht beachtet.

Beschränkungen und Grenzen des HELP-Modells

Oberflächenabfluss

HELP setzt voraus, dass aus umliegenden Gebieten oberflächlich kein Wasser in die Deponie einfließt. Außerdem wird die zeitliche Schwankung der Niederschlagsintensität nicht beachtet, d. h. Extremereignisse, wie Gewitter werden nicht exakt behandelt. Bei Verwendung von SCS-Werten aus der programminternen Datei ist zu beachten, dass hier weder Gefälle noch Gefällelänge der Oberfläche beachtet werden. Deshalb empfiehlt es sich immer, die Möglichkeit der Modifikation der SCS-Kurve zu nutzen.

Wasserbewegungen im Boden

Es werden gesättigte Wasserbewegungen im Boden nach Darcy unter Einfluss der Gravitation in homogenen Schichten vorausgesetzt. Der bevorzugte Abfluss durch Kanäle wie Risse, Wurzellöcher und Tiergänge wird nur durch eine Multiplikation der hydraulischen Leitfähigkeit der obersten Bodenschicht mit einem Faktor in Ansätzen beachtet.

Das Modell berechnet keine Wasserbewegungen, die durch einen Gradienten der Saugspannung im Boden hervorgerufen werden. Somit werden Aufwärtsbewegungen durch kapillaren Aufstieg in Folge einer Austrocknung der oberen Bodenschichten nicht als solche modelliert, sondern wie ein Entzug durch Evapotranspiration behandelt. Abwärtsbewegungen auf Grund von Kapillarkräften, die durch tieferliegende, trockene Schichten hervorgerufen werden, werden als Flüsse nach Darcy modelliert.

Bei Kunststoffdichtungsbahnen wird vorausgesetzt, dass eine Versickerung nur durch Löcher stattfindet. Sickerwässer, die die KDB passiert haben, breiten sich unterhalb der KDB an der Grenzschicht zur mineralischen Dichtung aus. Danach perkolieren sie in die Dichtungsschicht, in Abhängigkeit von der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und dem Druckgradienten. HELP setzt voraus, dass Löcher in der KDB gleichmäßig verteilt sind. Nicht beachtet wird die Alterung der KDB, so dass Anzahl und Größe der Defekte nicht in Abhängigkeit von der Zeit variieren.

Blattflächenindex

Unter dem Blattflächenindex wird das Verhältnis der Blattfläche je m² Boden verstanden (LAI). Hierzu werden von HELP fünf verschiedene Bereiche angeboten:

LAI 1: ohne Bewuchs

LAI 2: Grasvegetation mit schlechter Bodendeckung

LAI 3: Grasvegetation mit mäßiger Bedeckung

LAI 4: gute Grasbestände

LAI 5: sehr gute Grasbestände

HELP verarbeitet keine Blattflächenindizes über 5. Die höheren Blattflächenindizes und die damit verbundenen höheren Evaporations- und Interzeptionsleistungen von Sträuchern, Stauden und Bäumen werden nicht beachtet. Sommergrüne Laubbäume weisen z. B. einen LAI von ca. 4 bis 12 auf, für Nadelbäume sind Werte um 12 typisch.

Schichten

Pro Simulation können bis zu 5 Dichtungssysteme (Basis-, Zwischen-, Oberflächenabdichtung) im Schichtaufbau berücksichtigt werden. Es sind bis zu 20 Schichten Böden und Abfall modellierbar, dabei wird der Abfall, wie jede andere Schicht auch, als homogene Schicht behandelt. Bei bekannten unterschiedlichen Ablagerungen ist es jedoch möglich, den Abfall in mehrere Schichten zu unterteilen.

Für die Anordnung der Schichten gibt HELP folgende Bestimmungen vor:

- Jede Schicht muss einem der vier Schichttypen zugeordnet werden
- Schichten mit vertikaler Perkolation dürfen nicht unter einer Dränageschicht liegen
- Eine KDB darf nicht direkt zwischen zwei mineralischen Dichtungsschichten angeordnet werden
- Kunststoffdichtungsbahnen dürfen nicht direkt aufeinander liegen
- Mineralische Dichtungsschichten dürfen nicht direkt zwischen zwei KDB liegen
- Die oberste Schicht darf keine KDB sein
- Die oberste Schicht darf keine mineralische Dichtungsschicht sein
- Mineralische Dichtungsschichten dürfen nicht unmittelbar übereinander liegen (mehrlagig eingebaute Dichtungsschichten müssen zu einer Schicht zusammengefasst werden)

- Das gesamte Profil darf nicht mehr als insgesamt fünf mineralische Dichtungsschichten bzw. KDB aufweisen
- Dichtungsschichten bleiben gesättigt
- Bei mineralischen Dichtungsschichten werden die Werte für Feldkapazität und permanenten Welkepunkt nicht für Berechnungen benutzt
- Bei KDB ist die Eingabe von Porenvolumen, Feldkapazität und permanentem Welkepunkt nicht erforderlich

In HELP werden keine Kapillarkräfte erfasst. Somit werden Schichtgrenzeffekte (z. B. Körnungssprung) nicht erfasst, weshalb eine Anwendung des Modells für Kapillarsperren nicht möglich ist.

Anhang 13 - Systemkurzbeschreibung zu BOWAHALD

BOWAHALD wurde speziell zur Modellierung der wesentlichen hydrologischen Prozesse, die innerhalb von ungesättigten Bergehalden bzw. Deponien (einschließlich Abdeckschichten) ablaufen, entwickelt bzw. weiterentwickelt. Das Modell ging aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAM hervor und wurde von der TU Bergakademie Freiberg und C&E Consulting und Engineering Chemnitz gemeinsam weiterentwickelt (DUNGER, 1995; DUNGER 1997).

Anwendung

- Halden/Deponien mit stark geneigter Oberfläche
- für Überschlagsrechnungen (einfaches, schnelles Modell-Handling, keine komplizierten Primärdatenstrukturen, geringer Speicherplatzbedarf auf PC)
- für einfache Oberflächen- und Haldenaufstandsflächenstrukturen

Die wasserungesättigte Bergehalde einschließlich einer möglichen Haldenabdeckung wird als Speicher gesehen, welcher durch infiltrierenden Niederschlags- und Schneeschmelzmengen sowie Versickerung aufgefüllt und durch Evapotranspiration und Abfluss entleert wird.

In Abb. 9 (letzte Seite) ist ein Überblick über die Modellstruktur von BOWAHALD 2-D gegeben.

Überblick über die durch die Teilmodelle erfassbaren hydrologischen Teilprozesse

1. Interzeption:

- Berücksichtigung der wesentlichen Haupteinflussfaktoren (meteorologische Faktoren: Niederschlag und potentielle Verdunstung sowie Vegetationsfaktoren: Vegetationsart, Vegetationsbedeckungsgrad, Vegetationsalter und jahreszeitliche Entwicklung)
- Stufen der Ermittlung der Interzeptionsverdunstung:
 - Ermittlung des maximalen Interzeptionsspeichervermögens
 - Ermittlung des realen Interzeptionsspeichervermögens
 - Berechnung der Interzeptionsverdunstung
 - Ermittlung des Niederschlages, der (vermindert um den Interzeptionsanteil) die Halden- bzw. Deponieoberfläche erreicht

2. Schneeschmelze:

- Anwendung des Tagesgradverfahrens (nach MERIAM, 1960 IN DYCK u. a., 1980)
- Berücksichtigung der Summe der Tagesmitteltemperaturen $T > 0\text{ °C}$ einer Schmelzperiode und eines von Standortfaktoren (Bewuchsart) und Schneeschmelzverlauf abhängigen Tagesgradfaktors

3. Oberflächenabfluss:

- Berücksichtigung der Haupteinflussfaktoren: Niederschlag, Infiltrationsvermögen (k_f -Wert) der Oberfläche, Vegetationsart, Bodenfeuchtenzustand, Oberflächengefälle und Hanglänge

- Anwendung des "Curve-Number"-Verfahrens (CN-Verfahren) des US Soil Conservation Service (US-SCS, 1964, 1972, HAAN, 1982) in der Spezifizierung für Deponien in Form des HELP-Modells
- Integration eines Muldenspeicherteilmodells (Modellansätze in MANIAK, 1982 und MANIAK, 1992)

4. Versickerung und hypodermischer Abfluss:

- Berechnung von Versickerungsmengen und Versickerungsgeschwindigkeit durch die Anwendung von DARCY- und Kontinuitätsgleichung bei Approximation der realen vertikalen Feuchteverteilung durch eine gesättigte Propfenströmung (Piston-Flow)
- Erfassung des hypodermischen Abflusses in Abhängigkeit vom k_f -Wertunterschied, vom Gefälle an der Schichtgrenze, an der der hypodermische Abfluss gebildet wird und von der Verweildauer des hypodermischen Abflusses innerhalb der Deponie/Halde
- ebenfalls im Teilmodell der Versickerung berücksichtigt: Stauwasserbildung und kapillarer Wasseraufstieg

5. Verdunstungsprozess:

- Abfolge der Verdunstungsmodellierung:
 - a) Berechnung der potentiellen (maximal möglichen) Verdunstung
 - b) Quantifizierung der realen Verdunstung
 - c) Modellierung des Bodenfeuchteverlaufes
- Formeln zur Berechnung der potentiellen Verdunstung:
- PENMAN (1948) modifiziert nach WENDLING u.a. (1991), Formeln nach TURC (1961) in Kombination mit der IVANOV-Formel (IVANOV, 1954) bzw. HAUDE (1955)
- programminterne Entscheidung bezüglich der Auswahl o. g. Formel(n) entsprechend der Güte des vorhandenen meteorologischen Datenmaterials (Vorhandensein bzw. Fehlen einzelner meteorologischer Messgrößen)
- expositions- und hangneigungsorientierte Korrektur der potentiellen Verdunstung nach GOLF (1981)
- Berechnung von realer Verdunstung und deren Auswirkungen auf den Bodenfeuchteverlauf nach KOITZSCH (1977) und KOITZSCH u.a. (1980) unter Berücksichtigung petrophysikalischer Parameter (Porositätsverhältnisse, Vorfeuchte) und pflanzenphysiologische Parameter (Vegetationsbedeckungsgrad, Wurzeltiefe und -verteilung)

6. Eingabedaten und Simulationsergebnisse:

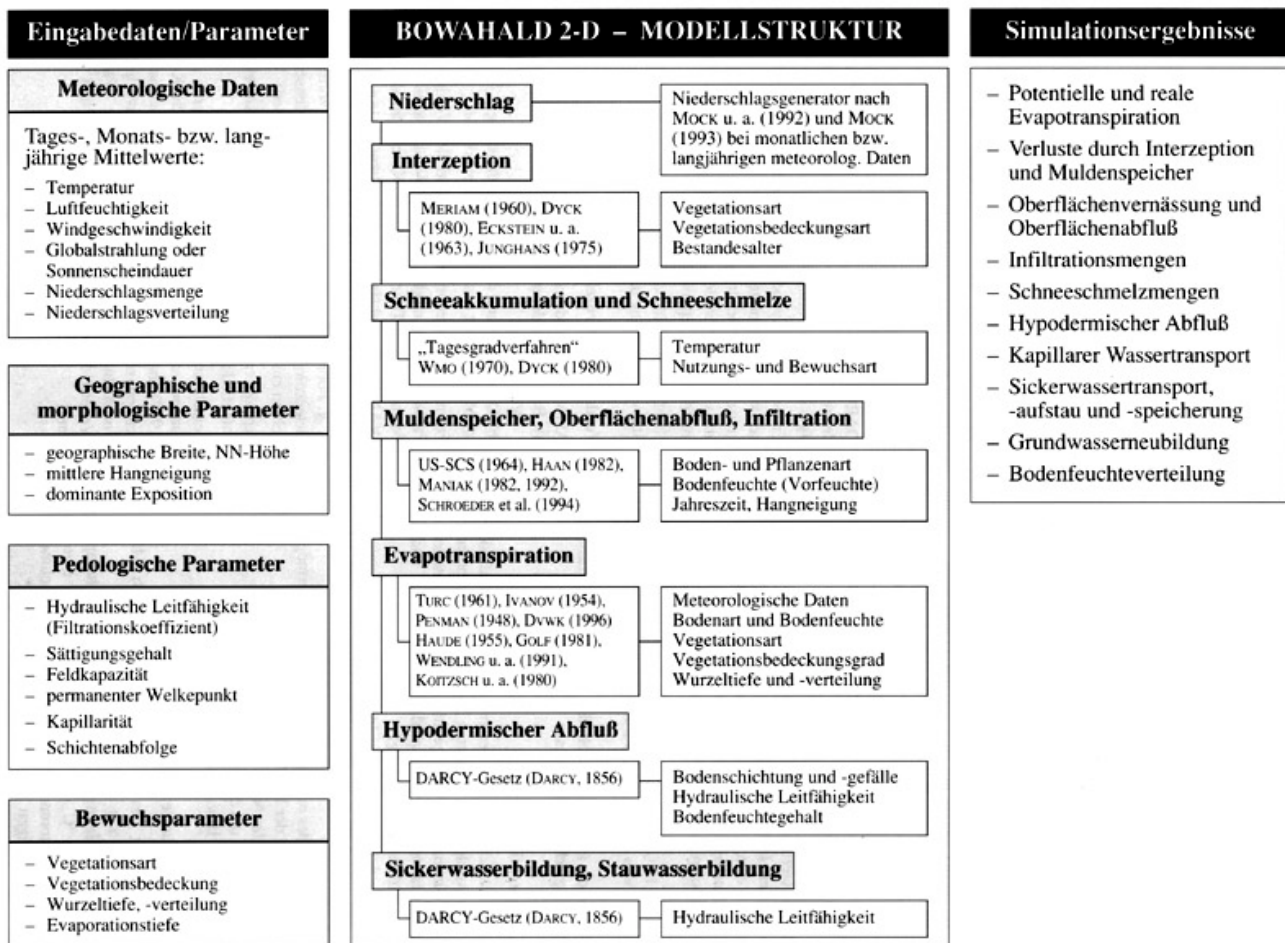


Abb. 9: Modellstruktur, Eingabedaten und Modellparameter sowie Simulationsergebnisse des konzeptionellen Boxmodells BOWAHALD 2-D

7. Modellfehler:

- stark vom Vorhandensein von Kalibrierungsinformationen (u. a. Oberflächenabfluss, Sickerwasser-, Bodenfeuchtemessungen) und von der zeitlichen Diskretisierung der meteorologischen Daten (Tages-, Monats- bzw. langjährige Monatsmittelwerte) abhängig
- bei Fehlen von Kalibrierungsinformationen und Modellierung mit langjährigen monatlichen Mittelwerten:
 - Verdunstungsmodellierung: ca. 10 - 20 %
 - Abfluss und Sickerwassermodellierung: schätzungsweise bis über 50 %, d. h. es kann z. B. bezüglich der Sickerwasserraten nicht mehr als die richtige Größenordnung erwartet werden, wobei dies für überschlägliche Vorabrechnungen bzw. im Rahmen der Planung (Szenarienvergleiche, Schichtenfolgeoptimierung) sehr wohl nützlich und ausreichend sein kann
- bei Vorhandensein von Kalibrierungsinformationen und Modellierung mit täglichen Messwerten: < 10 %

Anhang 14 - Übersicht über die wesentlichen Elemente des Wasserhaushaltes

Der Wasserhaushalt eines Gebietes wird durch die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung beschrieben und bilanziert die grundlegenden hydrologischen Vorgänge eines betrachteten Gebietes, beispielsweise auch von Ablagerungen. Die Wasserhaushaltsgleichung lautet:

$$P = ET + R \pm \Delta W$$

und in einer ausführlicheren Schreibweise:

$$P = E + EI + T + RO + RI + RG \pm \Delta W$$

Mit

P	=	Niederschlag
ET	=	Evapotranspiration (Gesamtverdunstung), bestehend aus : E = Evaporation EI = Interzeptionsverdunstung T = Transpiration
R	=	Abfluss, bestehend aus RO = Oberflächenabfluss RI = Zwischenabfluss (Interflow) RG = Grundwasserneubildung / Tiefensickerung
ΔW	=	Bodenfeuchtevorrat (Speicheränderung im Betrachtungszeitraum).

Bei gegebenem Niederschlag P auf eine Deponieoberfläche muss somit die Kombination von Bodensubstraten und Vegetation erhöhend wirken auf

- Evapotranspiration ET
- Bodenfeuchtevorratsänderung ΔW sowie
- Oberflächen- und Zwischenabfluss RO und RI, um eine Minimierung der Tiefensickerung RG zu erreichen.

Niederschlag (P)

Niederschlagsarten werden unterschieden in:

- fallenden Niederschlag (Regen, Sprühregen, Schnee, Eiskörner, Hagel)
- abgesetzten Niederschlag (Tau, Reif, Glatteis, Schneedecke) - Wasser, das direkt an Gegenständen kondensiert oder sublimiert ist

- abgefangenen Niederschlag (Nebelniederschlag, Nebelfrostniederschlag) - Wasser in fester oder flüssiger Form, das in der Atmosphäre kondensiert und überwiegend der Luftströmung folgend an Gegenstände gelangt ist.

In unseren Breiten haben Regen und Schnee die größte Bedeutung. In den höheren Lagen der Mittelgebirge ist der Anteil der an Oberflächen abgefangenen Nebel- und Wolkentropfen bei Wasserhaushaltsbetrachtungen zu beachten.

Die mit den Niederschlagsmessnetzen auf Freilandstationen durchgeführten Messungen erfassen die Niederschläge eines vegetationslosen Standortes. In Gebieten mit Vegetationsdecken treten als zusätzliche Größen der abgesetzte und der abgefangene Niederschlag auf. Durch die Interzeption, bei der Niederschlag an Pflanzenoberflächen aufgefangen und vorübergehend gespeichert wird, wobei ein Teil davon wieder verdunstet (Interzeptionsverdunstung), wird der Niederschlag volumenmäßig, räumlich und zeitlich beeinflusst.

Bei der Messung des Niederschlages wird unterschieden in punktuelle Niederschlagsmessung sowie Messung des Gebietsniederschlages. Die im Rahmen der Sicherung von Ablagerungen interessante punktuelle Niederschlagsmessung erfolgt mit einem Regenmesser nach HELLMANN, der mit einer Auffangfläche von 200 cm² 1 m über dem Erdboden aufgestellt ist. Im Gebirge wird oberhalb 500 m der Gebirgsregenmesser mit 500 cm² Auffangfläche eingesetzt (DYCK & PESCHKE, 1995). Über den Deutschen Wetterdienst (DWD) werden in Sachsen zahlreiche Wetter-, Klima- und Niederschlagsstationen betrieben, die die notwendigen Klimaparameter bereitstellen. Auskünfte über die nächstgelegene Station mit gemessenen Parametern können unter folgenden Adressen erhalten werden:

Deutscher Wetterdienst
Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung
Schuchstr. 7
01445 Radebeul
Tel.: 0351/83 92 70
Fax: 0351/83 92 713
(Regionales Gutachtenbüro
Sachsen)

bzw.

Deutscher Wetterdienst
Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung
PF 10 04 65
63004 Offenbach/Main
Tel.: 069/80 62 29 90
Fax: 069/80 62 29 93
(Zentrales Gutachtenbüro)

Gesamtverdunstung (ET)

Der Wasserhaushalt steht in enger Beziehung zum Stoff- und Energiehaushalt. Wasser- und Energiehaushalt sind durch die Verdunstung verbunden. Für die einzelnen Verdunstungsgrößen gelten folgende Definitionen (nach DIN 4049, Teil 3, "Begriffe zur quantitativen Hydrologie" bzw. AG BODEN (1994)):

Evapotranspiration (ET):

Gesamtverdunstung, Summe aus Evaporation, Interzeptionsverdunstung und Transpiration.

Evaporation (E):

Verdunstung von der Bodenoberfläche oder von freien Wasserflächen. Dabei sind biotische Prozesse ausgeschlossen.

Interzeptionsverdunstung (EI)

Verdunstung von Niederschlagswasser, das an der Pflanzenoberfläche zurückgehalten wurde. Die Interzeptionsverdunstung erfolgt unabhängig von der Transpiration durch die Pflanze. Die Höhe der Interzeptionsverdunstung ist abhängig von der benetzbaren Oberfläche der Pflanzen und vom Blattflächenindex (LAI, Blattfläche in m^2 je m^2 Boden).

Transpiration (T):

Verdunstung von der Pflanzenoberfläche aufgrund biotischer Prozesse.

Die Gesamtverdunstung wird in Abhängigkeit von dem für den Verdunstungsvorgang zur Verfügung stehendem Wasserangebot unterschieden in:

- potentielle Verdunstung bzw.
- reale Verdunstung.

Potentielle Verdunstung (ET_p):

Verdunstung von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Wasser. Die potentielle Verdunstung ist eine Rechengröße, die aus gemessenen meteorologischen Werten bestimmt wird. In Zeiträumen mit ausreichender Wasserversorgung der Pflanzen aus dem Bodenwasservorrat oder über Niederschläge bzw. den sehr geringen Verdunstungswerten im Winter gibt die potentielle Evapotranspiration die tatsächliche Verdunstung ausreichend genau an. Bei Austrocknung des Bodens im Sommer ist es jedoch notwendig, den tatsächlichen Bodenfeuchtegehalt (reale Evapotranspiration) in die Berechnungen einzubeziehen.

Reale Verdunstung (ET_a):

Verdunstung von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und begrenztem Wassernachschub. Die messtechnische Erfassung der Verdunstung ist aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen mit anderen Wasserhaushaltskomponenten sehr aufwendig. Für unterschiedliche

Verdunstungsflächen und Aufgabenstellungen kann keine einheitliche Methode verwendet werden. Angesichts der Komplexität wurde in der Vergangenheit von unterschiedlichen Fachdisziplinen eine Vielfalt von Mess- und Berechnungsverfahren entwickelt. Der DvWK-Fachausschuss "Verdunstung" hat in seinem Merkblatt "Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen" (DvWK, 1996) eine ausführliche Besprechung der einzelnen Bestimmungsmethoden sowie Kriterien für eine praxisorientierte Auswahl mit Beurteilung der Genauigkeit der ermittelten Größen und zugehörigem Arbeitsaufwand gegeben. Nachfolgend ist eine Übersicht über Berechnungsverfahren der Evapotranspiration gegeben.

Übersicht zu Berechnungsverfahren der Evapotranspiration (nach DvWK, 1996)

Potentiellen Evapotranspiration (Etp)		Evapotranspiration (ETa)reale
einfache, empirisch-statistische Methoden (nach DvWK, 1996)	physikalisch-begründete, komplexe Methoden (nach DvWK, 1996)	(nach DvWK, 1996)
HAUDE TURC-IVANOV THORNTHWAITE BLANEY-CRIDDLE	PENMAN WENDLING MAKKINK HARGREAVE	BAGROV-GLUGLA RENGGER-WESSOLEK WENDLING SPONAGEL

Charakterisierung ausgewählter Berechnungsverfahren zur potentiellen Evapotranspiration (nach DvWK, 1996)

HAUDE	TURC-IVANOV	PENMAN
- notwendige Eingangsgrößen: Lufttemperatur, Sättigungsdefizit der Luft mit Wasserdampf um 14.30 UHR MEZ, empirische Haude-Faktoren - für Böden mit hohem Grundwasserstand => Wassermangel bleibt unberücksichtigt	- notwendige Eingangsgrößen: Lufttemperatur Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer, in Trockengebieten zusätzlich relative Luftfeuchte - Ergebnisgenauigkeit: gute Korrelation der Ergebnisse im Vergleich zu langjährigen Messreihen, die etwas zu niedrige	- notwendige Eingangsgrößen: Strahlungsbilanz bzw. Globalstrahlung o. Sonnenscheindauer, Lufttemperatur, Dampfdruck der Luft, Windgeschwindigkeit, Tageslänge - Berechnung der ETp homogener Landflächen (niedriger Pflanzenbestand bzw. Gras bei guter Wasserversorgung)

Werten im Frühjahr können kompensiert werden, indem Jahressummen mit Korrekturfaktor 1,1 multipliziert werden	
- für Aussagen über einzelne Tage zu ungenau, bei Monatssummen, langjährigen Mitteln, für regionalen Überblick in Alten Bundesländern bewährt	- Berechnung von Tageswerten
- Ergebnisgenauigkeit: überschlägig bis befriedigend	- Ergebnisgenauigkeit: gut bis befriedigend

Neben der Vegetation wird die Verdunstung durch Neigung und Exposition der betrachteten Fläche beeinflusst. In Abhängigkeit von der Neigung und Orientierung der Fläche ergeben sich besonders an strahlungsintensiven Tagen z. T. deutliche Erhöhungen der potentiellen Evapotranspiration. Für die differenzierte Verdunstungsberechnung von einzelnen Deponiehangbereichen müssen die Komponenten der Globalstrahlung auf geneigte Verhältnisse umgerechnet werden. Detaillierte Ausführungen sind in MARKWARDT (1990), DVWK (1996), BERGER (1998) enthalten. Für die überschlägige Wasserhaushaltsbilanzierung kann der Einfluss der Hangneigung jedoch für die Komponente Verdunstung vernachlässigt werden.

Abfluss (R)

Nach DIN 4049, Teil 3 wird als Abfluss das sich unter dem Einfluss der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche bewegende Wassers bezeichnet und folgende Einteilung vorgenommen:

- Oberflächenabfluss
- Zwischenabfluss und
- Grundwasserabfluss / Grundwasserneubildung verwandt.

Zu welchen Anteilen das durch Niederschlag vorhandene Wasser gespeichert, auf der Oberfläche, oberflächennah abgeleitet wird oder ins Grundwasser versickert, hängt von pedologischen, morphologischen und pflanzlichen Parametern ab.

Unter Oberflächenabfluss (RO) wird der Teil des Abflusses verstanden, der oberirdisch eine gewisse Fließstrecke zurücklegt. Oberflächenabfluss setzt dann ein, wenn die Niederschlagsintensität die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens übersteigt und das Gelände ein Gefälle aufweist. Wichtige Faktoren für die Entstehung von Oberflächenabfluss sind:

- Meteorologische Faktoren (Niederschlagsintensität, -dauer, -höhe)
- geographische Standortfaktoren (Hangneigung, Hangform, Bodenart)

Nach WOHLRAB (1992) tritt bei einer Regenintensität von 18 mm/h bzw. einem Hanggefälle $> 2\%$ Oberflächenabfluss auf. Im Winter und Frühjahr können infolge hoher Vorfeuchte und Bodenverschlammung bzw. gefrorenen Bodens auch schon geringere Intensitäten zu Oberflächenabfluss und damit Erosion führen. Mit dem Gefälle steigt - bei gleichbleibender Hanglänge - die Schleppkraft abfließenden Wassers und somit der Feststofftransport überproportional an. Der Einfluss der Hangneigung wird jedoch durch die dominierende Wirkung anderer Faktoren, insbesondere der Bodenart und dem Verdichtungsgrad, verdeckt. Für den Feststofftransport sind vor allem dichte Tonböden (wenig Grobporen) und schluffreiche Böden (Verschlammungsneigung) sehr gefährdet. Durch eine Vegetationsdecke wird der Oberflächenabfluss gemindert.

Zwischenabfluss / Interflow (RI) ist der Teil des in den Boden einsickernden Wassers, der nicht bis zum Grundwasser abfließt, sondern in oberen Bodenschichten so lange weiterfließt, bis er entweder an einem tiefer gelegenen Ort als dem der Versickerung wieder an die Oberfläche gelangt, oder von einem Gewässer aufgenommen wird. Zwischenabfluss tritt in geschichtetem Bodenprofil auf, bei dem der Oberboden wesentlich durchlässiger ist oder ein Kapillarsprung besteht. In homogenen Bodenschichten kann ein Zwischenabfluss aufgrund eines lateralen Bodenfeuchtegradienten auftreten. Der Zwischenabfluss erfolgt stets verzögert gegenüber dem Oberflächenabfluss und ist nur in nahezu gesättigten Böden von Bedeutung. Die Summe aus Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss ergibt den Direktabfluss.

Grundwasserabfluss / Grundwasserneubildung (RG) ist der Teil des infiltrierten Wassers, der im Grundwasserleiter zum Vorfluter abfließt; dieser Teil entspricht der Grundwasserneubildung (Tiefensickerung). Der Grundwasserabfluss stellt einen wesentlichen Teil des Abflusses dar. Reduzierend auf die Grundwasserneubildungsrate wirkt der kapillare Aufstieg. Der kapillare Aufstieg ist von Bedeutung, wenn das in den Poren aufsteigende Wasser den Wurzelraum erreicht oder bis nahe an die Oberfläche gelangt. Geringe Grundwasserneubildungsraten bieten Böden mit einer stark differenzierten Schichtung, wenigen Grobporen und einer großen nutzbaren Feldkapazität. Hierzu gehören insbesondere stark schluffige Bodenarten.

Impressum

Titel- und Rückbild

Aufbringen einer Oberflächenabdichtung

Foto: Abfallwirtschaftsverband Chemnitz

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Stabsstelle 1, Öffentlichkeitsarbeit

Zur Wetterwarte 11, D-01109 Dresden

eMail: Poststelle@lfugdd.smu.sachsen.de

Internet: <http://www.lfug.de>

Autoren:

Kerstin Renner

Dr. Erik Nowak

Referat Altlasten

Manfred Keil

Referat Abfalltechnik

Abteilung Abfall/Altlasten

Redaktionsschluss: März 1999

Gestaltung, Satz, Repro:

Werbeagentur Friebe

Pillnitzer Landstr. 37, D-01326 Dresden

Druck und Versand:

Lößnitz-Druck GmbH

Güterhofstr. 5, D-01445 Radebeul

Fax: 0351/8309893 (Versand)

Auflage: 1.000

Bezugsbedingungen:

Diese Veröffentlichung kann von der Lößnitz-Druck GmbH gegen 15 DM bezogen werden.

Hinweis:

Diese Veröffentlichung wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (LfUG) herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern im Wahlkampf zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme des Landesamtes zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden kann. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.

Copyright:

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen und der fotomechanischen Wiedergabe, sind dem Herausgeber vorbehalten.

Gedruckt auf Recyclingpapier

Juni 1999

Der Freistaat Sachsen ist im Internet !

Internet-Adresse: <http://www.sachsen.de>